

AISによる予定航路情報と航海情報に基づく自律的 交通管理に関する研究

著者	Tran Viet, Hung
学位名	博士（工学）
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2007
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000819/

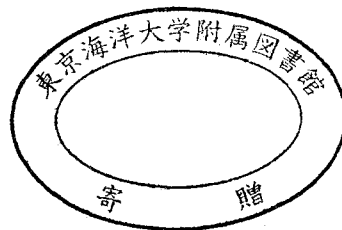
博士学位論文

AIS による予定航路情報と航海情報に基づく

自律的交通管理に関する研究

平成 19 年度

(2008 年 03 月)



東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

応用環境システム学専攻

TRAN VIET HUNG

目次

第1章	序論	1
1.1	序論	1
1.2	本研究の目的および概要	2
第2章	AISの概要	4
2.1	AIS導入の経緯	4
2.2	AISの一般要件	6
2.3	AISの運用状況	7
第3章	ATMSの構成	9
3.1	ATMSの構成	9
3.2	ATMSの運用	11
3.3	ATMSの実証実験	11
第4章	最適航路決定法および検証シミュレーション	18
4.1	自船の最適航路決定法	18
4.1.1	DPによる最小時間問題を解く方法	18
4.1.2	DPによる最適航路決定法	20
4.2	衝突の危険判定法	21
4.2.1	バンパーモデル	21
4.2.2	SJ値	22
4.2.3	DCPA・TCPA	27
4.3	開発したプログラムの検証シミュレーション	29
4.3.1	自船の速力を一定とした場合	29
4.3.2	自船の減速を考慮した場合	32
4.3.3	AISデータを用いたシミュレーション	34
4.3.4	レーダ観測データを用いたシミュレーション	40
4.4	交通管理を行う海域を航行する全船の最適航路決定法	43
第5章	交通管理海域における安全性・効率性の評価	47
5.1	交通評価手法	47
5.2	東京湾の入り口付近におけるAISデータによる交通評価	49
5.3	レーダ観測データによる東京湾内の交通評価	54

第 6 章	ATMS のシミュレーションによる安全性・効率性の評価.....	66
6.1	東京湾の入り口付近における AIS データを用いたシミュレーション.....	66
6.1.1	シミュレーション設定.....	66
6.1.2	シミュレーション結果および解析.....	68
6.2	東京湾内におけるレーダ観測データを用いたシミュレーション.....	74
6.2.1	シミュレーション設定.....	74
6.2.2	シミュレーション結果および解析.....	80
第 7 章	最適航路から偏れた場合の再計算方法.....	95
7.1	最適航路の再計算アルゴリズム.....	95
7.2	最適航路の再計算するシミュレーション結果.....	96
第 8 章	本論文の結論および今後の課題・展望.....	103
8.1	本論文の結論.....	103
8.2	今後の課題・展望.....	107
謝辞	108
参考文献	109

1.1 序論

上に述べたように船舶による輸送は日本の国民にとって非常に重要な役割を果たしているが、近年それに伴い、同時に海を利用する船舶の輸送には常に船舶同士の衝突・乗揚げ・遭難等の事故があり、またこれらの事故によって自然環境に悪影響を及ぼすようなリスクを抱えるようになってきた。

船舶同士の衝突のみについて考えると、もし N 隻の船の間で出会いが起り、それぞれの船が右転、左転、減速など n 通りの操船のいずれかをとるとして相手船 $(N-1)$ 隻の動き方は $n^{(N-1)}$ 通りあり、船の数の指数関数として N とともに急増する。しかし、これは海上衝突予防法や操船者の能力の限界を超えるものである。この n と N を減らさない限り輻輳水域における衝突多発は避けられないのである⁽²⁾。したがって、海上衝突を含めて、海難事故を減少させるためには新技術を活用した航行支援システムを開発する必要がある、陸上からも監視できればダブルチェックでき事故確率をかなり小さくできるだろう。

1.2 本研究の目的および概要

近年、インターネットに代表される高度情報通信技術（IT）は、その短期間の飛躍的な発展により、社会全体に大きな変革をもたらした。いわゆる「IT 革命」と呼ばれている大変化である⁽³⁾。IT 技術を利用した交通体系の改革が陸上交通を中心に急速に進められており、カーナビゲーションシステムや先進安全自動車の各種機能が現実化している。一方、海上交通・物流においても、IT 技術を応用した安全性と輸送効率の向上が不可欠であると考えられている。

港内や湾内における船舶運航の安全性と効率性を向上させるために、「海の ITS (Intelligent Transport System)」を構築するいくつかのプロジェクトが国土交通省により 2000 年から開始された。同時にこの期間、新 SOLAS 条約第 V 章により 2002 年 7 月 1 日以降、全旅客船と 300 トン以上の外航貨物船および 500 トン以上の内航貨物船に AIS (Automatic Identification System-船舶自動識別装置) の搭載が段階的に義務化され、300 トン以上の外航貨物船は 2004 年 12 月までに全船が AIS を搭載することになった。特に東京湾や大阪湾は輻輳海域としては世界随一と言われており、一日約 700 隻が狭い浦賀水道を介して出入りするとの統計がある⁽⁴⁾。AIS はこのような海上交通が輻輳する海域における衝突回避や海上交通管理に大きく貢献することが期待されている。

AIS は海上交通管理の分野で幅広く利用されつつあるが、AIS の情報を利用して各船の最適航路を計算する研究についてはほとんど行われていない。そこで、本研究では、港内や湾内における船舶航行の安全性と効率性を向上させるために、AIS による予定航路情報と航海情報に基づく自律的交通管理システム (Autonomous Traffic Management System、以下 ATMS と記す) を開発することを目的とした。本論文は主に ATMS により得られる情報を用いて最適航路 (戦略的な避航航路) を計算するアルゴリズムを開発した部分と、このシステムを任意の海域に導入後、その海域の交通の安全性と効率性がどの程度改善できるかを検証した部分から構成される。

本論文は 8 章に分けられ、それぞれの章では次のことについて論じる。

第 1 章は、序論として海上輸送が日本にとってかけがえのない存在でありながら、船によって引き起こす海難事故が年々危険性を増してきたことについて述べる。また、海上での事故を減少させるために新技術の導入の必要性を強調し、本研究の目的と概要を示す。

第 2 章は、近年、船舶の安全航行に貢献できると期待されている AIS の導入経緯、一般要件、および運用状況について述べる。

第 3 章は、本研究において開発した ATMS の概要について述べる。ここでは、まず ATMS の構成を示し、当初発生した通信問題とその解決方法について述べる。次に、ATMS を使用する場合について、予定航路情報をどのように作成するか、およびその航路情報はどのような経路で送受信されるかを説明する。さらに、ATMS が持つ機能について簡単に述べる。最後に、ATMS が設計通りに作動するかどうか、またシステムの性能や有効性を確認するための海上実験および操船シミュレータ実験について述べる。

第4章は、最適航路決定法と衝突の危険判定について述べる。まず、避航アルゴリズムにおいて使用する一般的なダイナミック プログラミングについて述べる。次に、AIS によって得られる航海情報と ATMS によって得られる詳細な予定航路情報に基づき最適航路を計算する前進型ダイナミック プログラミングと衝突の危険を判定する方法について説明する。また、開発した最適航路の有効性を検証するために、仮想的な遭遇状態および船舶交通データから作成される遭遇状態についてシミュレーションを行い、その結果を示す。さらに、任意の海域にこのシステムを導入する場合、全船の最適航路をどのように決めるかについて説明する。

第5章は、任意の海域において ATMS を導入する前に、その海域における船舶交通がどのような状態にあるかについて交通評価を行う。本研究に使用する船舶データは AIS およびレーダ観測によるものである。AIS データは東京湾の入り口付近の海域で取得したものであり、レーダ観測データは東京海洋大学の東京湾リモートレーダネットワークシステムにより得られたものである。ここでは、まず、交通評価手法について述べる。次に、それぞれの海域について一般的に用いられている交通評価指標および本研究で提案する評価指標で交通評価を行う。

第6章は、ATMS のシミュレーションによる安全性・効率性の評価について述べる。ここでは、ATMS システムの有効性を検証するため、まず第5章で交通評価の対象となった海域を ATMS を導入する海域と仮定し、「先船優先条件」で全船の最適航路を計算する。次に、各船が最適航路を航行する場合では海域の安全性・効率性がどの程度改善されるかについて第5章の結果と比較しながら検証を行う。

第7章は、自船が最適航路から何らかの原因で大きく偏れた場合の対応について述べる。ここでは、自船の最適航路を再計算するアルゴリズムと再計算するときの条件について説明し、このアルゴリズムに基づいていくつかのシミュレーションを行う。最適航路を再計算するシミュレーション結果により自船が最適航路から偏れた場合において ATMS の有効性を確認する。

第8章は、本研究で行ったことを各章毎にまとめ、得られた成果に基づき最適航路を決定できる ATMS の有効性を簡潔に述べると共に、今後の課題について論じる。

第2章 AIS の概要

2.1 AIS 導入の経緯

北欧のスウェーデンには多数の島が存在しストックホルム近海のみでも約 3,000 余り有り、また海岸線がフィヨルド構造となっていることから船舶通行海域の狭いところが非常に多い。このような環境の中で安全航行のため他船の動向を掌握する際に、レーダでは島影や半島によるブラインド領域が起これ他船の探知が困難な場合がある。AIS は、このレーダでの探知が困難な船の情報を得る手段としてスウェーデンで考案された装置である。AIS の義務装備が実現するまでに約 12 年以上の歳月が経過した⁽⁵⁾。

AIS 導入の主な経緯は下記のとおりである。

- ・ 1988－1989 : IALA (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities : 国際航路標識協会) の VTS 委員会に専門組織を入れ、初期 AIS の検討を実施。
- ・ 1990 : IALA より NAV36 (Safety of Navigation) にて検討内容を発表した。
- ・ 1996 : NAV46 にて VHF/DSC、Broadcast の技術が認められたが、新しい周波数の検討を必要とした。
- ・ 1997 : IMO (International Maritime Organization : 国際海事機構) は国際 VHF 帯用の 2 チャンネルを AIS 用に割り当てることを要請した。
- ・ 2000 : 12 月、MSC (Maritime Safety Committee) にて SOLAS 第 V 章改正 (2002 年 7 月 1 日 AIS 搭載開始) を承認した。
- ・ 2002 : 7 月、一定の船舶に段階的に AIS 搭載開始。

また、AIS 搭載要件に関しては SOLAS 第 V 章の改定により次のように規定されている。

- ・ 国際航海船

- ・ 対象

全旅客船と 300 GT 以上の貨物船

- ・ 搭載期間 (2 年以内に廃船される船舶は免除)

2002 年 7 月 1 日以降の建造船 → 建造日

2002 年 6 月 30 日以前の建造船

全ての旅客船 → 2003 年 7 月 1 日

タンカー → 2003 年 7 月 1 日以降初回検査

50,000 GT 以上 → 2004 年 7 月 1 日

10,000 GT 以上 → 2005 年 7 月 1 日

3,000 GT 以上 → 2006 年 7 月 1 日

300 GT 以上 → 2007 年 7 月 1 日

- ・ 非国際航海船

- ・ 対象

- 全旅客船と 500 GT 以上の貨物船

- ・ 搭載期間（2 年以内に廃船される船舶は免除）

- 2002 年 7 月以降の建造船 → 2003 年 7 月 1 日

- 2002 年 6 月以前の建造船 → 2008 年 7 月 1 日

この搭載予定によると 2008 年 7 月までに AIS を搭載義務対象船舶に搭載することになったが、アメリカの強い要求により既存船（国際航海従事船）の搭載期限が船舶の種類に関わらず、2004 年 7 月 1 日後の最初の検査日または 12 月 31 日までに短縮された。

Fig. 2.1.1 に AIS 情報の概念図を示す。Fig. 2.1.1 が示すように AIS は自船の周りの船舶を自動的に識別してその船の様々な情報を自動的に取得するため、VHF を用いて、以下のような処理を行う。

- ① 定められたタイミングあるいは他船や陸上施設からの要求に応じて、AIS が使用する VHF チャンネルの電波で自船の情報を放送して、他船や陸上施設に知らせる。
- ② AIS が使用する電波を受信し、他船や陸上施設からの情報を受信する。
- ③ 得られた情報を処理して表示・利用する。

これにより、船同士あるいは船と VTS センター（Vessel Traffic Service Center：海上交通センター）等の船と陸上施設間で、AIS を装備した船舶の存在が自動的に確認できると共に、この双方向通信を用いて多種多様な情報をやり取りすることが可能となる⁽⁶⁾。

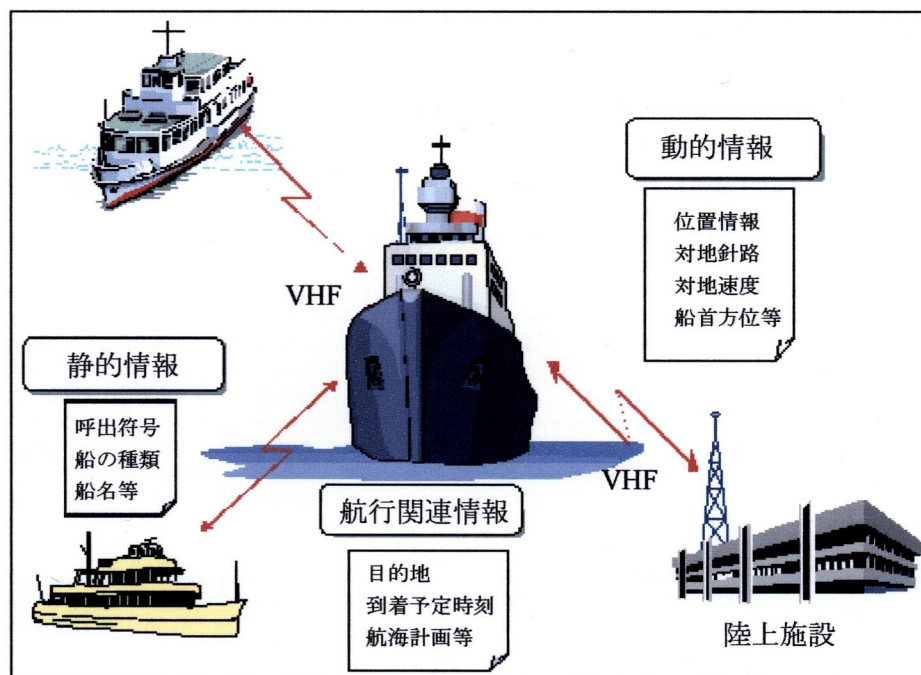


Fig. 2.1.1 Concept of AIS information

2.2 AIS の一般要件

現在搭載されているクラス A の AIS の基本仕様を Table 2.2.1 に示す。情報更新間隔に関しては船舶の航海状態によって次のようになる。

- ・ 静的情報 : 6 分毎、データ改正時、および要求に応じる
- ・ 動的情報
 - 錨泊中で 3 knots 以下 : 3 分毎
 - 錨泊中で 3 knots 以上 : 10 秒毎
 - 0 ～ 14 knots : 10 秒毎
 - 0 ～ 14 knots 変針中 : 10/3 秒毎
 - 14 ～ 23 knots : 6 秒毎
 - 14 ～ 23 knots 変針中 : 2 秒毎
 - 23 knots 以上 : 2 秒毎
 - 23 knots 以上 変針中 : 2 秒毎
- ・ 航海関連情報 : 6 分毎、および改正と要求に応じる
- ・ 航海安全関連情報 : 必要に応じて任意

AIS 搭載船舶は情報を 150 MHz 帯 VHF で送受信し、相手船の識別、動静の把握、衝突回避のための情報交換を行うことが可能となる。具体的に船舶局から放送されるメッセージ内容を、Table 2.2.2 に示す。また、陸上でこの AIS 信号を受信することにより、搭載船の位置、船速、針路等の把握が可能となり、陸上側から船舶運航管理、航海の安全に関する情報提供を行うことが可能となる。

Table 2.2.1 Main specification of Class A AIS

主要規格	MSC.74 (69) Annex 3, IEC 61993-2 (Draft), ITU-R M.1371-1
AIS チャンネル	CH87B (161.975 MHz) CH88B (162.025 MHz)
地域周波数	156.025 – 162.025 MHz
地域周波数制御	CH70 (156.525 MHz) DSC
チャンネル間隔	12.5 kHz / 25 kHz
送信電力	12.5 W (2 W)
変調方式	GMSK
ビットレート	9600 bps
通信方式	SOTDMA、世界標準時同期
タイムスロット	2250 スロット/分 (1 スロット=256 ビット)

Table 2.2.2 AIS information

Dynamic Information	Static Information
Position(latitude, longitude)	MMSI, IMO number
Universal Time Coordinated	Call sign & Name
Position accuracy	Length & Beam
COG(course over the ground)	Type of ship
SOG(speed over the ground)	Location of antenna
Heading	Draught
Rate of turn	Hazardous cargo
Navigating status	Route plan (Waypoint)

なお、AIS 電波の伝達距離は、基本的にはアンテナ間の見通し距離（可視距離）が通達距離となる。式（2.2.1）は到達距離を計算するものである。船舶側のアンテナの高さには制約があるため、陸側の受信アンテナはできるだけ情報収集したい海域に近い、高い場所に設置することが望ましい。

$$M_d = 2.07(\sqrt{H_s} + \sqrt{H_L}) \quad (2.2.1)$$

M_d : 最大伝播距離 (mile)

H_s : 船舶のアンテナ高さ (m)

H_L : 受信所のアンテナ高さ (m)

2.3 AIS の運用状況

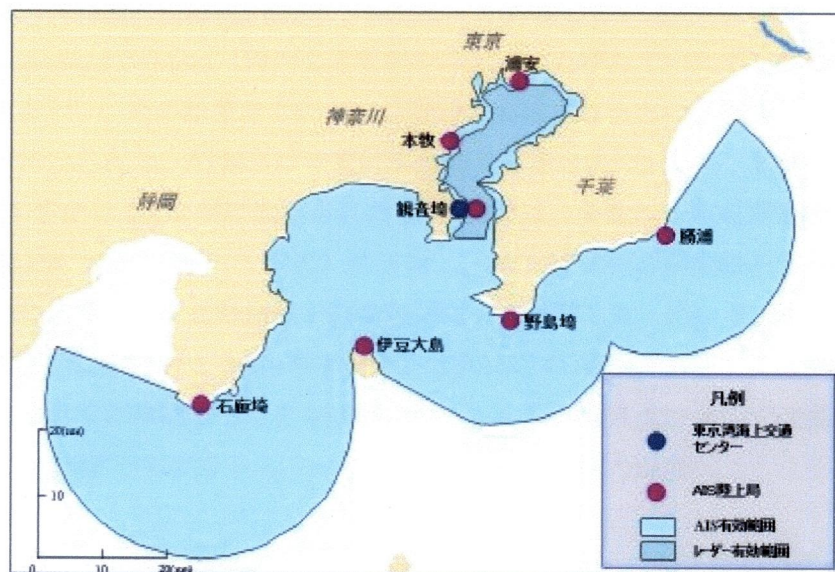
従来、船舶航行海域の周囲状況を把握するための装置、特に遠方の目標や霧による視界制限状況下での目標の探知には、船用レーダ以外には適当なものがなかった。ところが、一定の要件の船舶に対して搭載義務化が始まった AIS の出現によって、周囲の船舶についてレーダよりも高精度な位置、針路、速力などの情報がリアルタイムで得られるようになり、さらに船舶の船名、種類、識別符号、目的地、積荷などの情報も入手できるようになった⁽⁷⁾。

そこで、日本国内の各海上交通センター（東京湾海上交通センター、大阪湾海上交通センター、名古屋港海上交通センター、伊勢湾海上交通センター、備讃瀬戸海上交通センター、来島海峡海上交通センター、関門海峡海上交通センター）では AIS を導入し、AIS の持っている特有の機能を使って新たな業務を行うようになっている。現在 AIS を活用した主な業務は以下のようがある。

- ① AIS を活用した情報提供 : AIS のバイナリーメッセージ（宛先指定または放送形式）機能を利用して、気象状況、航路付近の操業漁船、航路および航路周辺の工事作業状況、

海難などの緊急性・重要性の高い安全情報などの情報提供を行っている。音声情報と異なり、AIS 情報においては聞き漏らしがなく保存可能な文字情報の特性を活用し、情報提供の利便性を向上させている。

AIS を活用した航行支援業務を行っているエリアの一例を Fig. 2.2.1 に示す。Fig. 2.2.1 が示すように、東京湾海上交通センターのほか、浦安レーダ施設、本牧船舶通航信号所および勝浦・野島埼・伊豆大島・石廊埼各灯台の 7 箇所に AIS 陸上局を設置し、AIS 搭載船舶と自動的にデータ通信を行っている。東京湾内は地域周波数により運用されている⁽⁹⁾。



第3章 ATMS の構成

第2章ではAISの概要および現在の運用状態について述べた。AISを活用した海上交通支援システムは様々であるが、AIS情報を利用して安全かつ効率的な船舶の最適航路を計算する研究は殆ど行われていない。ここでは、AISによる予定航路情報と航海情報に基づく自律的な交通管理システムについて、構成・機能、海上での実証実験、および操船シミュレータ実験について述べる。

3.1 ATMS の構成

現在、船上のAISトランスポンダは、第2章2.2節のTable 2.2.2に示したように、識別番号(MMSI number: Maritime Mobile Service Identity number)・船名・船の長さ・船の種類等の静的情報、緯度・経度・対地針路・対地速度・船首方位等の動的情報、喫水・危険積載物・目的地等の航海関連情報および航海安全関連情報を送信する。沿岸海域や東京湾・大阪湾のような比較的広く船舶の輻輳する海域では、このAISは衝突回避や海上交通センターによる交通管理のための強力なサポートシステムとなっている。しかし、港内やそのアプローチ海域においては、各船は多くの変針を行いながら予定航路上を航行する。詳細な予定航路情報は、市販されているAISでは容易に送信することができないので、このような海域では通常のAISのみを用いて有効な衝突回避や交通管理を行うことは難しい。

そこで、萩原・Hungらは港内やそのアプローチ海域において、AISを装備している各船の詳細な予定航路情報を収集し、避航操船や交通管理をサポートする自律的交通管理システム(Autonomous Traffic Management System)を開発している⁽¹⁰⁾。開発した当初はPort Traffic Management System(港内交通管理システム)と呼んでいたが、その後各船が自律的に最適な避航を行い、その結果自立的な交通管理が実施されるという意味から自律的交通管理システムと名付けられた。ATMSは予定航路情報の伝送方法に関して、2つの段階を経て開発された。2001年から2002年に開発されたATMSでは、各船の予定航路情報データを携帯電話を用いて陸上のATMSサーバ(PC)に送信し、ATMSサーバが全船の予定航路データを管理して、各船に全船の予定航路情報を携帯電話により送信した。Fig. 3.1.1に示す東京海洋大学の練習船「汐路丸」を用いて2002年の2月と3月にこのATMSの海上実験を東京湾で行い、システムが設計通りに作動することを確認した。しかし、東京湾の北部では携帯電話の電波が弱く、船上のATMS携帯端末と陸上のATMSサーバとの間の通信ができなくなる問題が発生した。

この通信に関する問題を解決するため、予定航路データをATMS携帯端末からAISトランスポンダに送り、AISのBinary Messageとして送信するATMSを2003年に開発した⁽¹⁰⁾。このATMSシステムの構成をFig. 3.1.2に示す。システムのハードウェアは、操船者の近くに置かれるATMS携帯端末とAISのJunction Boxに接続されるAIS LANサーバである。



Fig. 3.1.1 Training ship Shioji Maru

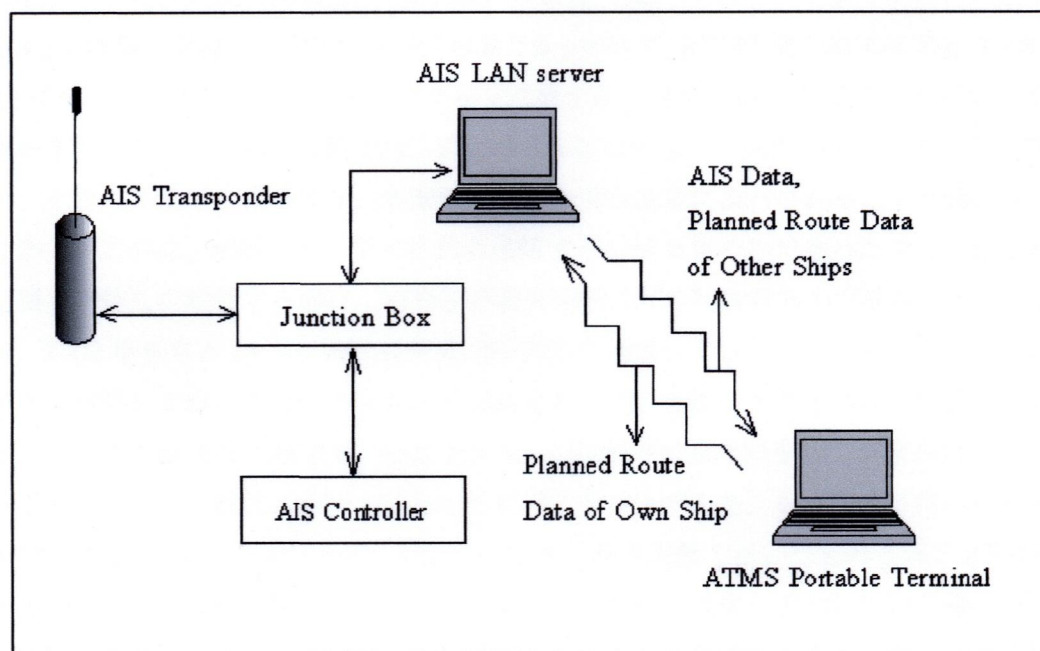


Fig. 3.1.2 Configuration of ATMS used for the second-stage onboard experiment in 2003

3.2 ATMS の運用

2003 年までの ATMS の運用を簡単に説明すると次の通りである。

まず、船が港域に近づくかバースを離れるときに、ATMS 携帯端末の電子海図画面上でマウスを用いて予定航路データ（予定航路の経由地点）を作成する。予定航路データは、無線 LAN で AIS LAN サーバに送られ、Junction Box から AIS トランスポンダに入り、AIS の Binary Message として送信される。次に、AIS トランスポンダは、他船の予定航路データおよび AIS データを受信し、それらを AIS LAN サーバから無線 LAN で ATMS 携帯端末に送る。また、自船の AIS データも AIS LAN サーバから無線 LAN で ATMS 携帯端末に送られる。

ATMS 携帯端末では、電子海図画面上に自船と他船の予定航路がすべて表示され、また AIS データから得られる自船と他船の現在位置、対地速度ベクトル、船名、船の長さ等が表示される。これらのデータを使うことにより、自船と他船の現在位置と対地速力・船の長さおよび予定航路の情報に基づいて、将来、「いつ・どこで」自船が他船と危険な遭遇状態となるかを予測することができる⁽¹⁾。このオペレーションを、「危険船判定モード」と呼ぶ。これらの機能を検証するために、海上での実船実験および操船シミュレータ実験を行った。以下に検証実験について述べる。

3.3 ATMS の実証実験

開発した ATMS システムの性能を評価するため、東京海洋大学の小型練習船「やよい」（全長 17.8 m）と「おおたか」（全長 16.5 m）に AIS を搭載し、2003 年 6 月 25 日に海上での実船実験を行った。両船に搭載した AIS は日本無線（株）の JHS-180 である。Fig. 3.3.1 と Fig. 3.3.2 は海上実験中の「やよい」と「おおたか」を示す。ATMS 携帯端末は Fig. 3.3.3 と Fig. 3.3.4 に示すようにそれぞれの船のブリッジに置かれ、両船の船長は ATMS 携帯端末を見ながら操船を行った。この海上実験では、Fig. 3.3.5 に示すように両船から多くの予定航路が送信され、それらが受信・表示でき、危険船判定モードも正常に実行されることが確認された。

しかし、この海上実験では、予定航路を送信する船が 2 隻のみであったので、多くの船が予定航路を送信して航行する場合、ATMS が衝突回避にどの程度有効かは検証できなかった。そこで、2003 年 9 月と 11 月に海上技術安全研究所の操船シミュレータを用いて、多くの船が予定航路を送信して航行するシミュレータ実験を行った。実験シナリオでは、自船（大型コンテナ船、船長 319 m または練習船、船長 105 m）が川崎沖の東水路を出て東京西航路に向かう。操船者は、船会社と航海訓練所の船長およびパイロットである。シナリオに用いた他船の速力および長さを Table 3.3.1 に示す。Fig. 3.3.6 は、海上実験で用いたものと同じ ATMS 携帯端末を用い、携帯端末の画面を見ながら、大型コンテナ船の操船を指示している様子を示す。また、自船と 5 隻の他船の予定航路、現在位置と現在の 5 分間速度ベクトルおよび予定航路上の予測位置を Fig. 3.3.7 に示す。Fig. 3.3.7 が示しているように、予測された自船と他船の位置においては、危険な遭遇が発生するために自船および他船が赤で表示された。

このような操船シミュレータ実験を行った後のヒアリングにおいて、すべての操船者から「他船の予定航路情報は自船の予定航路を決める上で極めて有用であり、危険船判定モードも自船の予定航路がどの程度安全かを定量的に示してくれるので有用である。」とのコメントを得た。またパイロットからは、「船舶が輻輳する海域では、自船の安全な予定航路を決定することが困難であるため、自動的に最適な予定航路を決定できる機能が欲しい」とのコメントもあった。その要求に応え、ATMS の機能の 1 つとして、AIS によって得られる他船および自船の現在位置・対地速力・船の長さで開発された ATMS システムにより AIS の Binary Message として送受信される予定航路情報に基づき、目的地への最適航路を求める方法を開発した⁽¹²⁾。

さらに、現在開発中の ATMS を Fig. 3.3.8 に示す。Fig. 3.1.2 に示したように上記のシミュレータ実験以前は自船が操船者によって決められる予定航路を送るのに対して、Fig. 3.3.8 に示す ATMS では、このシステムに参加する船舶は他船の AIS データおよび最適航路情報を受信してこれらのデータに基づき自船の最適航路を計算して航行することになる。

最適航路決定法またその航路の有効性を検証するためのシミュレーションを次章に述べることにする。また、任意の海域にこのシステムを導入し交通管理を行う場合、すべての船舶がどのように最適航路を決めるかについても次章で説明する。

Table 3.3.1 Information of other ships used in simulator experiment

Ship \ Information	Speed [knot]	Initial heading [Deg.]	Length [m]
A	10.0	158	192
B	10.0	258	76
C	12.0	80	94
D	8.0	150	94
E	9.8	135	70



Fig. 3.3.1 Yayoi in onboard experiment



Fig. 3.3.2 Ootaka in onboard experiment



Fig. 3.3.3 ATMS portable terminal on the bridge of Yayoi



Fig. 3.3.4 ATMS portable terminal on the bridge of Ootaka

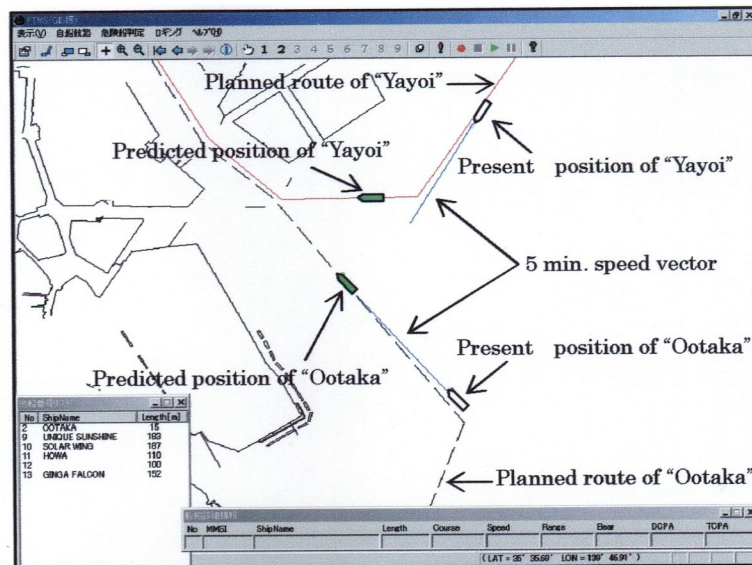


Fig. 3.3.5 Example of Dangerous Ship Judgment mode on the display of ATMS portable terminal



Fig. 3.3.6 Simulator experiment with a container ship

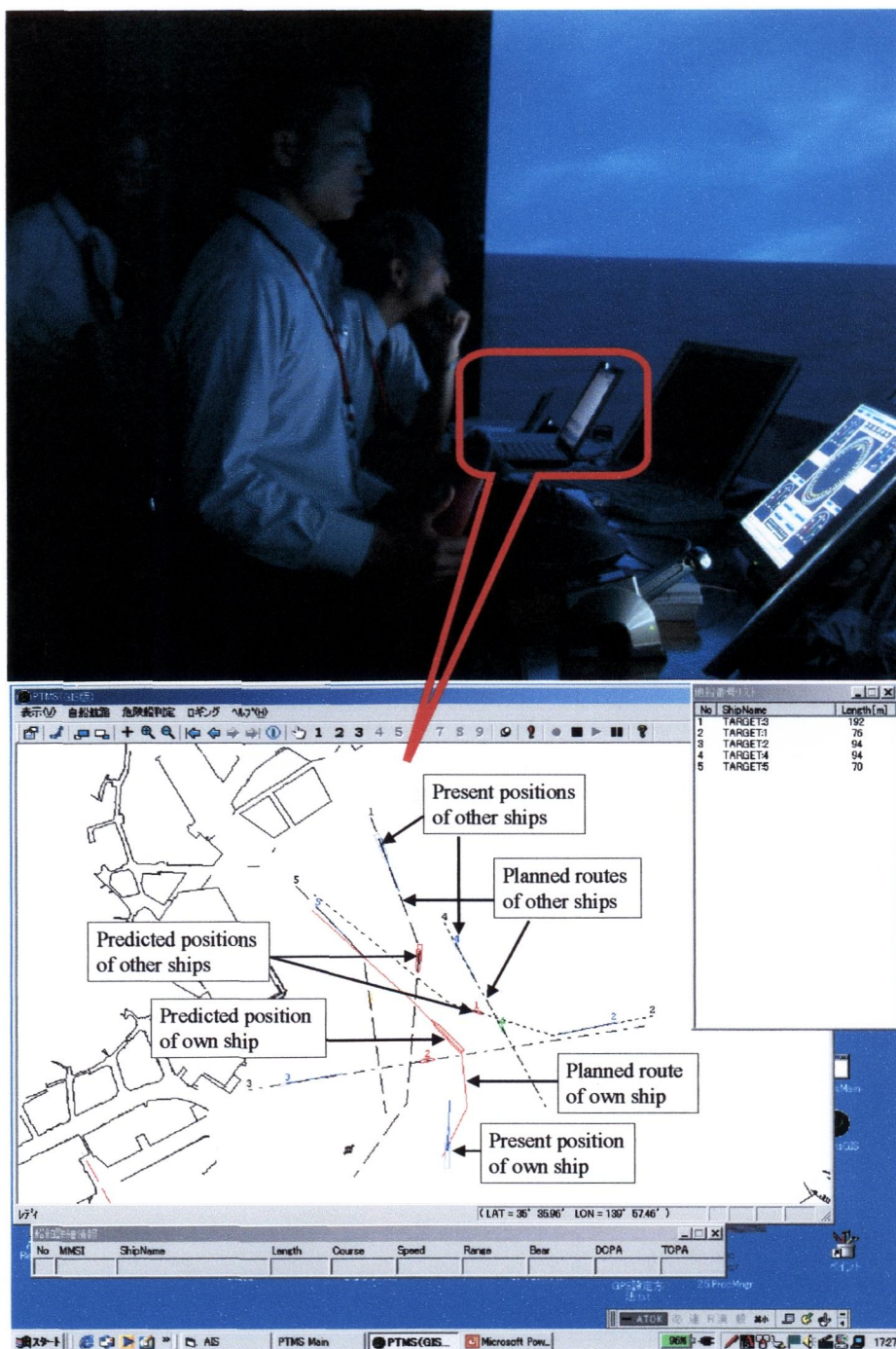


Fig. 3.3.7 Dangerous Ship Judgment mode on the display of ATMS portable terminal in simulator experiment

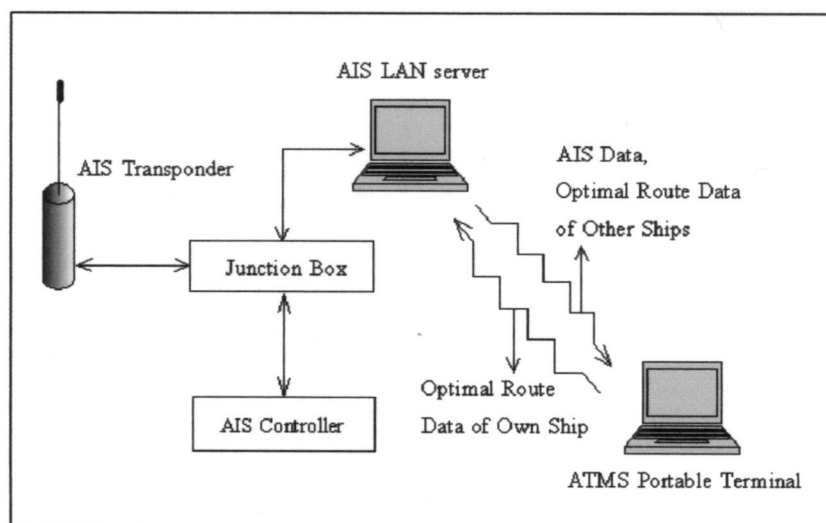


Fig. 3.3.8 Configuration of ATMS under development

第4章 最適航路決定法および検証シミュレーション

本章では、動的計画法（Dynamic Programming（以下、DP と記す））を用いる最適航路計算法を説明する。DP は 1950 年代に米国の数学者 R.Bellman により開発された強力な最適化手法である。また、この章には最適航路を計算する時に、衝突の危険判定に用いる評価指標についても述べる。

さらに開発したプログラムの有効性を検証するために、仮定的な遭遇状態また AIS データおよびレーダ観測データによって得られた遭遇状態に基づきシナリオを作成し、シミュレーションを行う。最後に最適航路の有効性を確認した後、ある海域にシステムを導入し交通管理を行う場合、すべての船舶についての最適航路を計算する方法を説明する。

4.1 自船の最適航路決定法

4.1.1 DP による最小時間問題を解く方法

本節で考える最小時間問題は、経路網の2点間を移動するのに要する時間が与えられたとき、経路網を通して原点から目的地に至る最小時間の経路を見出す問題と等価である。このことを説明するアナロジーとして Fig. 4.1.1 に示すシステムについて考える。このシステムは6つの町とそれらをつなぐ経路から成り立つ経路網である。各隣り合った2点を結ぶ経路の沿え字は、これらの隣り合った町の間を移動するのに要する時間を表わす。この問題の解を簡単にするために、すべての経路は一方通行であるとする。一方通行の方向は矢印で示してある。この問題では、町①と町⑥つなぐ経路の中で最小時間のものを求めることである。

ここで、 $f(i)$ を町 i から町⑥に移動するのに必要な最小時間と定義する。この問題は $f(1)$ と最適経路とを見出す問題となる。いま、町 i から町 j に移動するとする。町 j から町⑥に至る最小時間は $f(j)$ であるから、町 i と町 j とを結ぶ経路を移動するのに t_{ij} 時間がかかるとすると、町 i から町 j それから町⑥に移動するのに要する最小時間は式 (4.1.1) によって計算される。

$$f(i) = \min_j [t_{ij} + f(j)] \quad (4.1.1)$$

この種の問題を解くための DP の普通の方法は、町⑥から出発して町①にもどる後進型の計算をする方法である。すなわち、最後の段階から逆向きに出発する。

この問題に対しては、まず $f(6)$ を求める。その後、 $f(5)$ 、 $f(4)$ 、 $f(3)$ 、 $f(2)$ 、そして最後に $f(1)$ を求める。明らかに $f(6)=0$ であるから、 $f(5)$ は式 (4.1.2) によって求められる。

$$f(5) = \min_{j=6} [t_{5j} + f(j)] = t_{56} + f(6) = 2 \quad (4.1.2)$$

同様に、 $f(4)$ は式 (4.1.3) により計算される。

$$\begin{aligned}
f(4) &= \min_j [t_{4j} + f(j)] = \min [t_{45} + f(5), t_{46} + f(6)] \\
&= \min [5 + 2, 6 + 0] = 6
\end{aligned} \tag{4.1.3}$$

これは、町④から町⑥への最適経路は町④→町⑤→町⑥ではなく、町④→町⑥であることを示す。同様に

$$\begin{aligned}
f(3) &= \min_j [t_{3j} + f(j)] = \min [t_{34} + f(4), t_{35} + f(5)] \\
&= \min [2 + 6, 4 + 2] = 6
\end{aligned} \tag{4.1.4}$$

町③から町⑥への最適経路は町③→町⑤→町⑥である。 $f(3)$ の値が求まったので、 $f(2)$ の値は

$$\begin{aligned}
f(2) &= \min_j [t_{2j} + f(j)] = \min [t_{23} + f(3), t_{24} + f(4), t_{25} + f(5)] \\
&= \min [3 + 6, 1 + 6, 4 + 2] = 6
\end{aligned} \tag{4.1.5}$$

となる。町②から町⑥への最適経路は町②→町⑤→町⑥となる。最後に、 $f(1)$ は

$$\begin{aligned}
f(1) &= \min_j [t_{1j} + f(j)] = \min [t_{12} + f(2), t_{13} + f(3)] \\
&= \min [2 + 6, 4 + 6] = 8
\end{aligned} \tag{4.1.6}$$

となる。したがって、最適経路は町①→町②→町⑤→町⑥である。町①から町⑥へ移動するために要する最小時間は8時間である⁽¹³⁾。

本例題では、一般的な最小時間問題を多段決定問題として定式化し、それを解くことにより答を得たのである。しかし、本研究では船舶の最適航路を計算するための条件が本例題と異なるため、前進型 DP を用いることにした。次節に前進型 DP による自船の最適航路を求める方法について説明する。

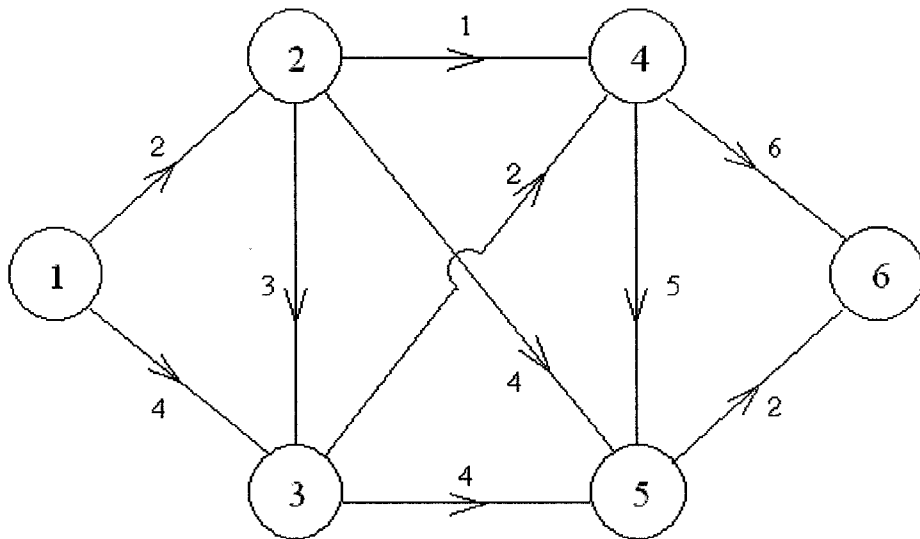


Fig. 4.1.1 Sample of problem being solved by Backward Dynamic Programming

4.1.2 DP による最適航路決定法

本研究では自船の最適航路を求めるための手法としては、前進型 DP を用いる。ここでは本論文で設定した問題に対する前進型 DP による最適航路のアルゴリズムを示す。

現在位置 P_D と目的地 P_A を結ぶ直線を n 等分し、各等分点を通り、 P_D と P_A を結ぶ直線に直交する直線を設定する。そして、その直線上に等間隔で Fig. 4.1.2 に示すようにグリッドを配置する。 P_D から k 番目の直線上の i 番目のグリッドを $G(k, i)$ 、 P_D からグリッド $G(k, i)$ に到着するまでの最短航海時間を $T_{\min}(k, i)$ とする。このとき $T_{\min}(k, i)$ は式 (4.1.7) により計算される。

$$T_{\min}(k, i) = \underset{j}{\text{Min}} \{T(G(k-1, j), G(k, i)) + T_{\min}(k-1, j)\} \quad (4.1.7)$$

$$(k = 2, \dots, n-1)$$

ここで

$T(G(k-1, j), G(k, i))$: グリッド $G(k-1, j)$ からグリッド $G(k, i)$ までの航海時間

$\underset{j}{\text{Min}}$: 右辺を j により最小化すること

$G(k-1, j)$ から $G(k, i)$ まで自船を航走させる際、10 秒毎に他船との衝突の危険を判定し、もし衝突の危険が発生した場合にはこのグリッドの間の計算を中止する。(もしくは自船の速力を 0.5 knots ずつ落として再計算を行い、現在の速力の半分まで落としても自船が安全に航行できなければそのグリッド間の探索を中止する。) グリッド $G(k, i)$ までの最短航海時間 $T_{\min}(k, i)$ は、1 つ前の直線上のグリッド $G(k-1, j)$ からグリッド $G(k, i)$ への航海時間と $G(k-1, j)$ までの最短航海時間との和を最小にするように j を決定することにより計算される。

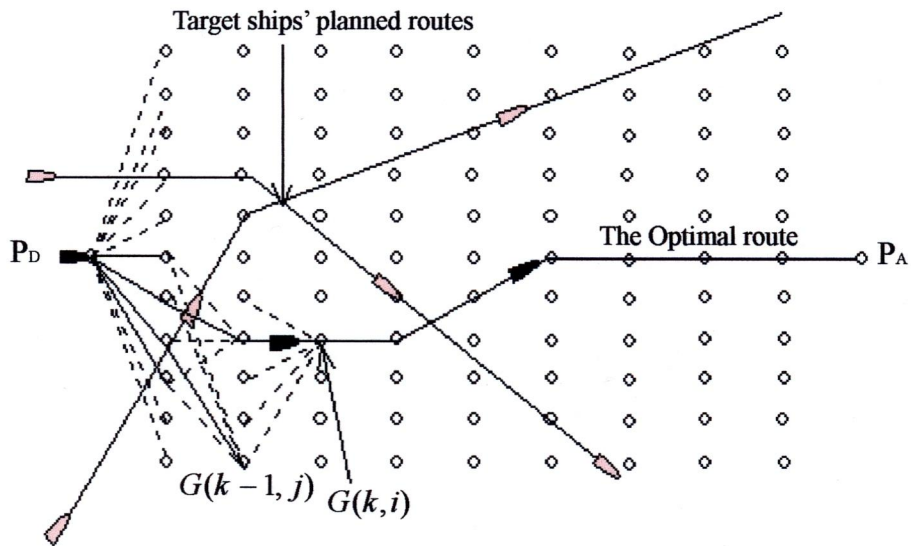


Fig. 4.1.2 Optimal route calculation by Forward Dynamic Programming

この手続きを進め、現在位置から最後の直線上のすべてのグリッドまでの最短航海時間を求める。そして、これらのグリッドから目的地までの航海時間を計算し、最短航海時間を与えるグリッドへの航路を P_D に向かってたどることにより最適航路を求めることができる。

ここで言う最適航路とは、現在位置から目的地までの最短航海時間航路であり、かつ「他船が予定航路上を予定の対地速力で進んできた場合、他船との危険な遭遇状態が発生しない」という拘束条件を満たす安全な航路である。また、ここではいくつかの衝突の危険判定方法を用いるが、「既に決定されている他船の予定航路情報を基に最適航路を求める場合、拘束条件に自船の危険判定法のみを考慮した最適航路は、他船にとっては危険な遭遇状態になる場合もある。」ということから、本研究で行うシミュレーションのすべては自船と他船の SJ 値を両方とも考慮している⁽¹¹⁾。

4.2 衝突の危険判定法

本研究に用いる他船との衝突の危険を判定する方法として、バンパーモデル⁽²⁾、SJ (Subjective Judgment) 値⁽¹⁴⁾ 及び DCPA (Distance of Closest Point of Approach、自船と他船の最接近距離)・TCPA (Time to Closest Point of Approach、自船と他船の最接近点までの時間)を用いた。これらの衝突の危険度を用いる理由は、以前に開発した ATMS の「危険判定モード」では、衝突の危険を SJ 値とバンパーモデルにより判定していたが、SJ 値は遭遇状況により衝突の危険を合理的に判定できないことがあるため、本研究では DCPA・TCPA も考慮することにした。それぞれ指標について次に説明する。

4.2.1 バンパーモデル

まず、バンパーモデルとは、各船が自船の周囲に他船の進入を許さないバンパーを持って航行していると仮定し、2 船のバンパーが重なった場合、その 2 船は衝突の危険があるとするものである。普通、バンパーの大きさは、Fig. 4.2.1 の左図のように自船を中心として前方が長半径 $6.4L$ の半楕円、後方が $1.6L$ の半円である (L は自船の長さ)。

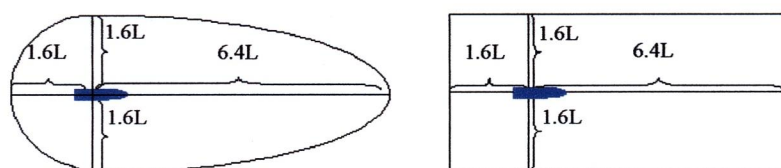


Fig. 4.2.1 Bumper Model

しかし、計算を簡単にするためにバンパーの形は Fig. 4.2.1 の右図のように簡略化し、自船の前方 6.4 L、後方 1.6 L、右横 1.6 L、左横 1.6 L の長方形とした。2 船のバンパーが重なった場合は、危険な遭遇状態となるので、最適航路を求めるプログラムにはバンパーが重ならないという拘束条件を取り入れた。

4.2.2 SJ 値

SJ 値とは、「操船者が相手船に対して感じる主観的な衝突危険度」で、操船シミュレータ実験の結果から得られたものであり、相手船との相対方位変化率、自船と相手船との距離、自船と相手船との相対速度を用いて回帰式で計算される⁽⁴⁾⁽¹¹⁾。本研究では、見合い関係を簡略化し、2 船の針路差が $170^\circ \sim 180^\circ$ である場合を「行き合い」、 10° 以内である場合を「追い越し」、それ以外の場合を「横切り」とし、それぞれの見合い関係について実験式により SJ 値を計算する。

SJ 値は操船シミュレータ実験において、+3 (非常に安全) から -3 (非常に危険) までの値を取る。ATMS の「危険船判定モード」では、自船と相手船の SJ 値が両方とも正の場合、遭遇は安全として両船を緑色で表示し、少なくともどちらかの船の SJ 値が -1 以下の場合、遭遇は危険として両船を赤色で表示する。上記のように簡略化された横切り、行き合い、追い越し状態の 3 ケースについての SJ 値は、式 (4.2.1)~(4.2.5) により計算する。

(1) 横切りの場合

避航船

$$SJ = 6.00\Omega + 0.09R' - 2.32 \quad (4.2.1)$$

保持船

$$SJ = 7.01\Omega + 0.08R' - 1.53 \quad (4.2.2)$$

(2) 行き合いの場合

$$SJ = 6.00\Omega + 0.09R' - 2.32 \quad (4.2.3)$$

(3) 追い越しの場合

追い越し船

$$SJ = 54.43\Omega + 0.24R' + 2.77 dR'/dt - 0.784 \quad (4.2.4)$$

追い越される船

$$SJ = 3 \quad (4.2.5)$$

ここで

$\Omega = |d\theta/dt| \cdot L_o / V_o$: 無次元化した相対方位変化率

$R' = R / \{(L_o + L_T)/2\}$: 無次元化した自船と相手船の距離

$dR'/dt = V_R / V_o$: 無次元化した相対速度

$d\theta/dt$: 相手船の方位変化率 [rad/min]

L_o : 自船の船長 [m]

L_T	: 相手船の船長 [m]
V_O	: 自船速度 [m/min]
V_R	: 相対速度 [m/min]
R	: 自船と相手船との距離 [m]

次に SJ 値の特徴を理解するために、上記の式を用いていくつかの見合い関係における SJ 値を計算し、表示する。まず、Fig. 4.2.2 には長さ 100 m、速力 10 knots の 2 隻の船舶が横切る場合の SJ 値を示す。2 船間が 2295 m のところで、避航船の SJ 値がマイナスになり始め、1315 m のところでは -1.13 という危険な値になった。また、最接近の直前に SJ 値が最小値となるのが特徴である。

Fig. 4.2.3 は長さ 100 m、速力 12 knots の 2 隻の船舶が行き合いで通過する場合の SJ 値を示している。500 m の DCPA で航過する 2 船が互いに CPA（最接近点）に達する 1 分前の SJ 値は最小値 -1.081 となった。

また、追い越しの場合の SJ 値を Fig. 4.2.4 に、そのときの 2 船のバンパーの状態を Fig. 4.2.5 に示す。Fig. 4.2.5 において、赤色の長方形は 2 船のバンパーが重なり始めるところと終わるところを示す。Fig. 4.2.5 から分かるように、追い越される船の SJ 値は 3 であり、追い越し船の SJ 値は 2 船間の距離が 614 m のところからバンパーが重なっても危険な値にならないことがわかる。

なお、SJ 値は、行き合いの場合には衝突の危険を過度に大きく判定し、また追い越しの場合には衝突の危険を過度に小さく判定する傾向がある⁽¹²⁾。そこで、Fig. 4.2.6 および Fig. 4.2.7 に示すように行き合いおよび追い越しの場合は SJ 値による危険判定を行わず、DCPA・TCPA により危険判定を行う。また、Fig. 4.2.8 に示す横切りの見合い関係には SJ 値による危険判定を行うこととした。

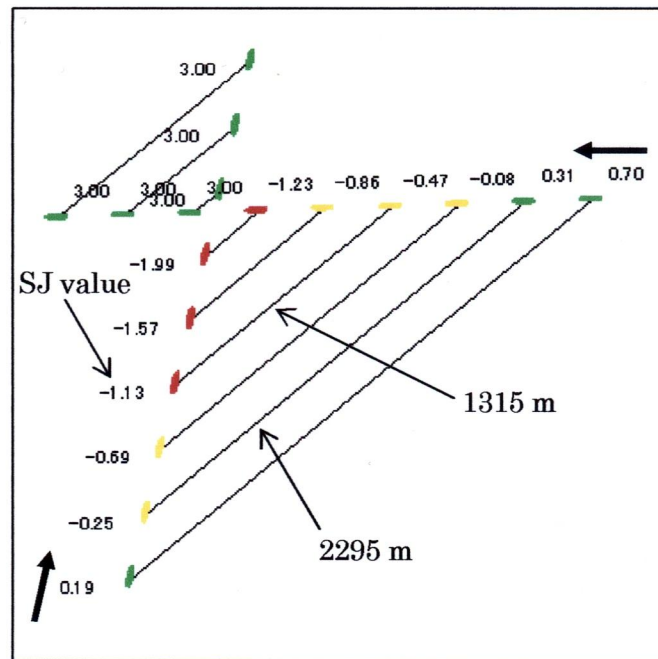


Fig. 4.2.2 SJ value in the case of crossing encounter
(Ship length: 100 m, ship speed: 10 knots, crossing angle: 105 deg.)

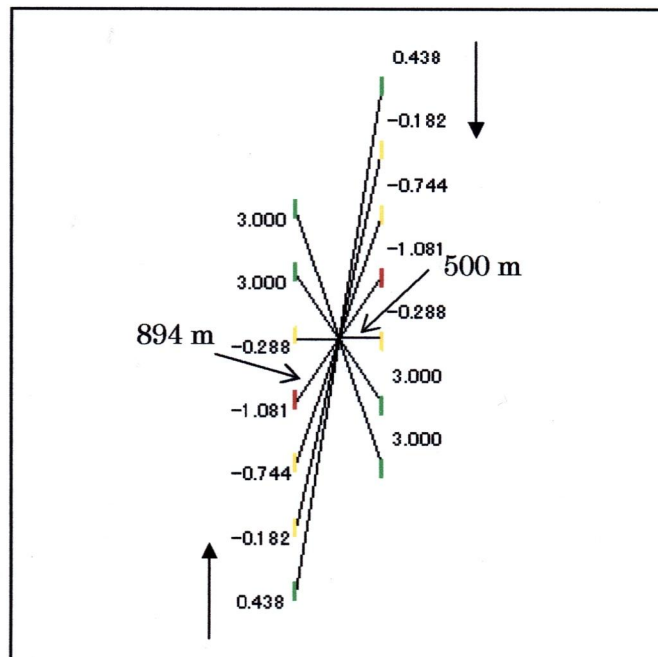


Fig. 4.2.3 SJ value in the case of head on encounter
(Ship length: 100 m, ship speed: 12 knots, DCPA: 500 m)

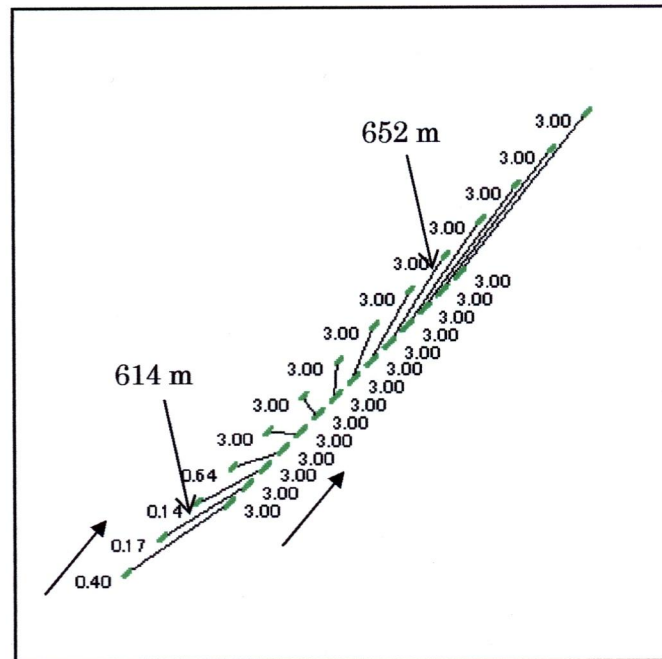


Fig. 4.2.4 SJ value in the case of overtaking encounter
(Overtaking ship: 70 m, 10 knots; Overtaken ship: 100 m, 5 knots)

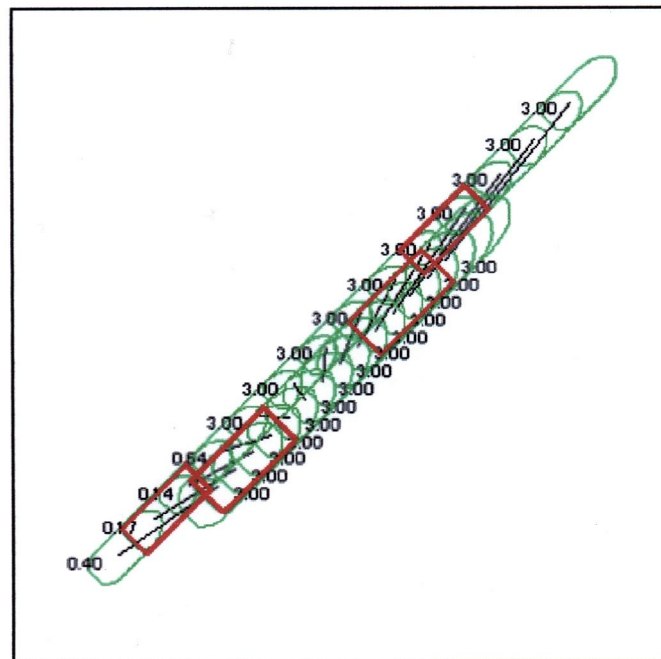


Fig. 4.2.5 SJ value in the case of overtaking encounter
(Display in Bumper Model)

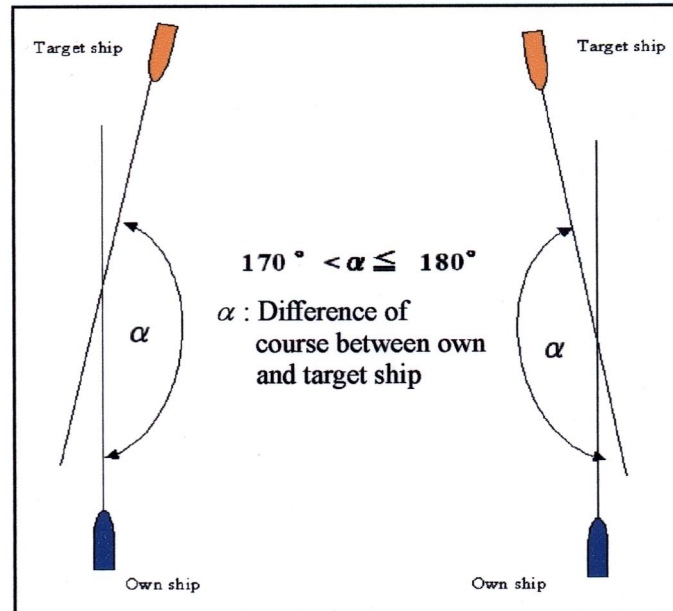


Fig. 4.2.6 Range for collision judgment by DCPA • TCPA
(Head on encounter)

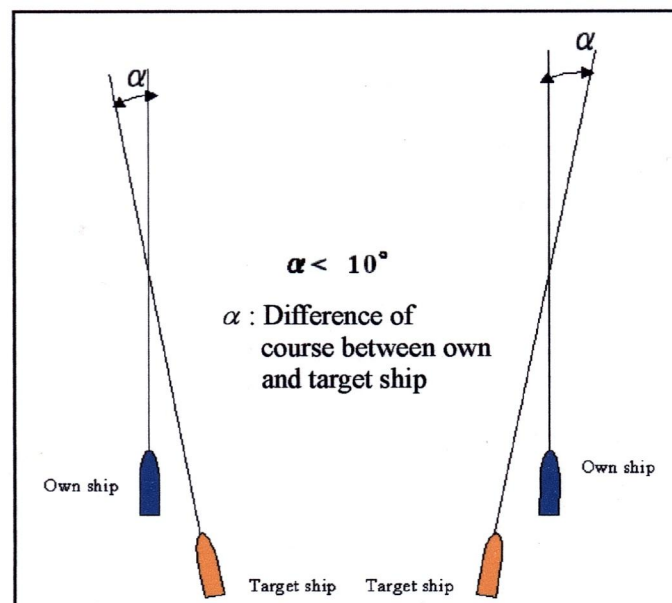


Fig. 4.2.7 Range for collision judgment by DCPA • TCPA
(Overtaking encounter)

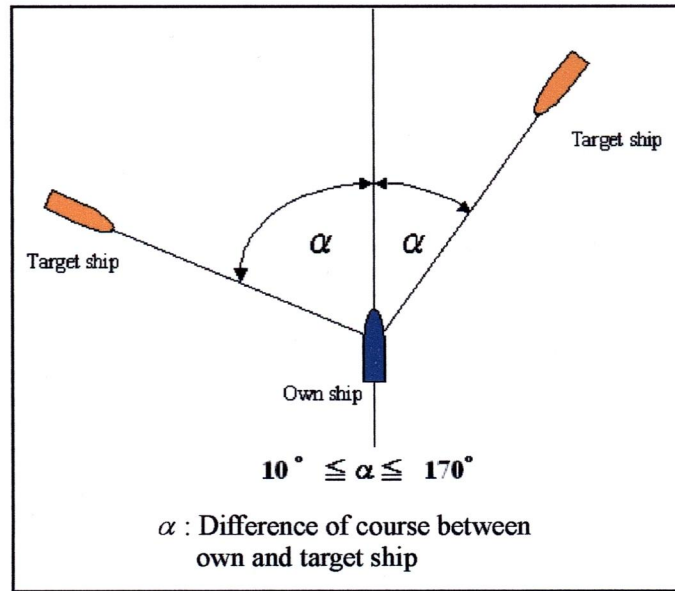


Fig. 4.2.8 Range for collision judgment by SJ value

4.2.3 DCPA・TCPA

従来から操船者に使用されている船舶の周囲状況を把握する装置の一つにレーダがある。近年ではそのレーダの機能の一つとして ARPA があり、ARPA を使用することにより、他船との DCPA・TCPA を取得でき、DCPA・TCPA は避航にとって非常に有効とされている。Fig. 4.2.9 には DCPA・TCPA の概念を示す。本研究のプログラムでは次の手順に従って DCPA・TCPA を計算する。

まず、自船および他船の現在の速力と現在の対地針路を用いて、Fig. 4.2.9 に示すように式 (4.2.6) から相対速力を求める。次に、他船から自船へ向かうベクトルと相対速力ベクトルとのなす角 α を算出する。そして、自船の位置、他船の位置と最接近点からできた三角形を解くことにより、DCPA・TCPA を式 (4.2.7) と (4.2.8) で求める。

$$\vec{V}_O + \vec{V}_R = \vec{V}_T \quad (4.2.6)$$

$$DCPA = d \times \sin \alpha \quad [\text{m}] \quad (4.2.7)$$

$$TCPA = \frac{d \times \cos \alpha}{V_R} \quad [\text{sec}] \quad (4.2.8)$$

Fig. 4.2.10、Fig. 4.2.11 には、式(4.2.7)と(4.2.8)により計算された DCPA・TCPA の 2 例を示す。Fig. 4.2.10 には一分毎の船の位置を示し、2 隻の船が 543 m の DCPA で航過するものを示す。また、Fig. 4.2.11 には 2 隻の船が 667 m の DCPA で航過するものを示す。

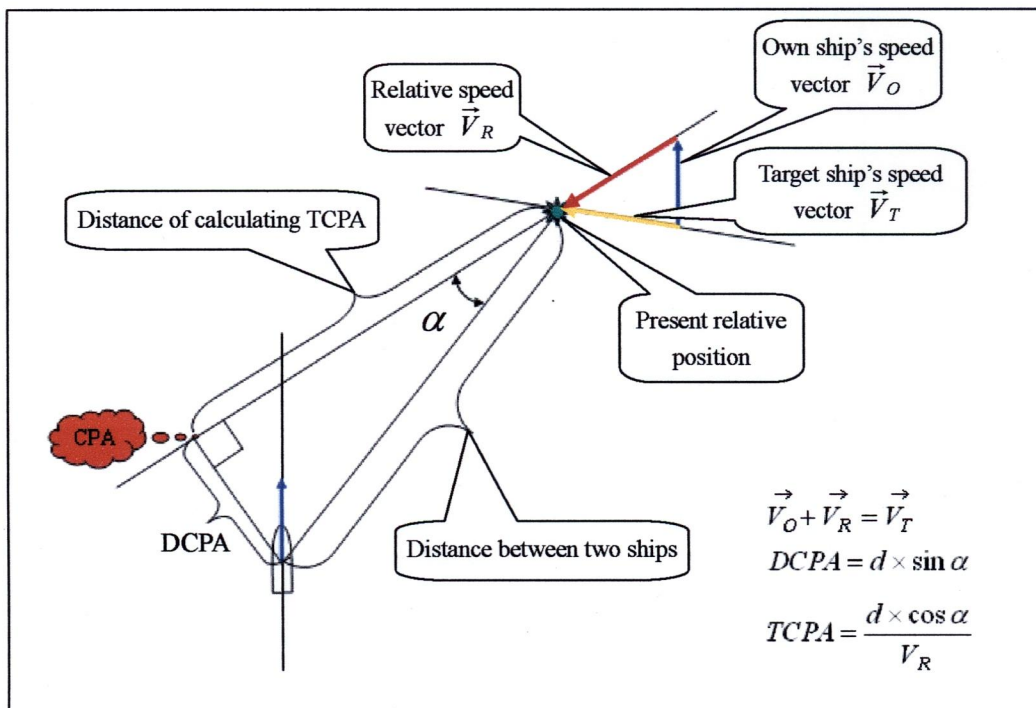


Fig. 4.2.9 Calculation of DCPA • TCPA

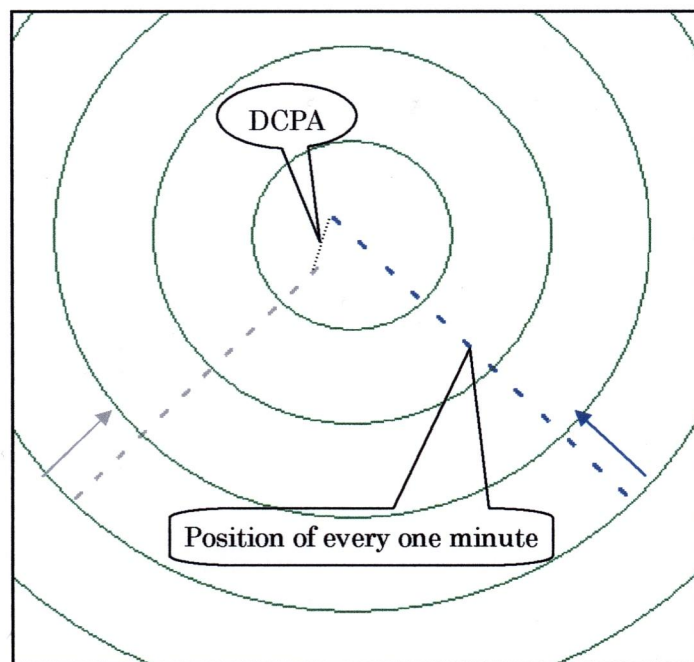


Fig. 4.2.10 Sample of DCPA • TCPA
(Both ships: 100 m, 10 knots)

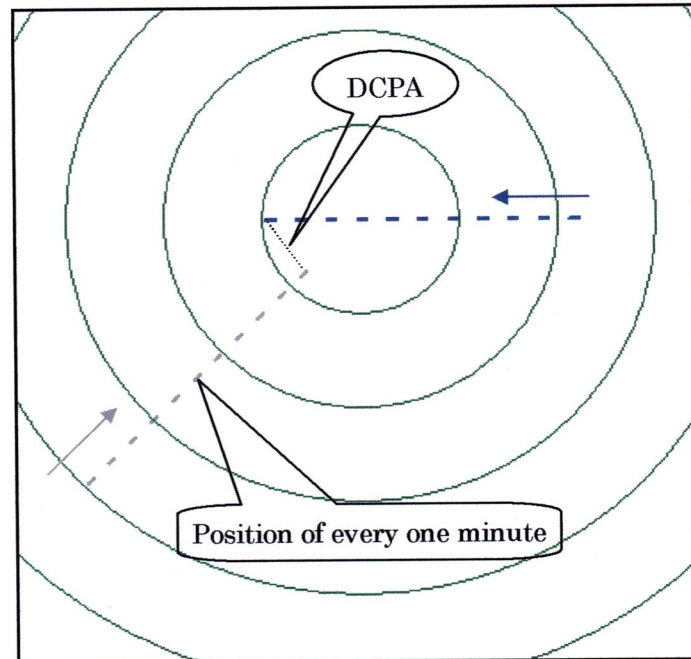


Fig. 4.2.11 Sample of DCPA・TCPA

(The left ship: 100 m, 10 knots; the right ship: 100 m, 12 knots)

以下のシミュレーションに用いる安全な DCPA とは、自船と他船の平均長さ 3.2 倍以上の距離と仮定し、また安全な TCPA とは他船との最接近点までの時間が 5 分間より長いと仮定する。DCPA を自船と他船の平均長さの 3.2 倍以上としたのは、この距離はバンパーが重ならない距離だからである。また、TCPA の制限値を 5 分間としたのは、最接近点までの時間が 5 分あれば、通常安全に避航することが可能であると考えられるからである。

4.3 開発したプログラムの検証シミュレーション

開発した最適航路計算のプログラムを検証するために、いくつかのシナリオを作成しシミュレーションを行う。以下にそのプログラムを用いて様々な遭遇状態において、自船の最適航路を計算し、その有効性を検証する。

4.3.1 自船の速力を一定とした場合

まず、Fig. 4.1.2 に示したように現在位置 P_D と目的地 P_A を結ぶ直線を 10 等分し、各等分点を通る直線上にその海域をカバーできるグリッドを 100 m の間隔で設定する。

DP のグリッド間の計算において、他船との衝突の危険が発生した場合はそのグリッドの探索を中止するとする。そのアルゴリズムを Fig. 4.3.1 に示す。

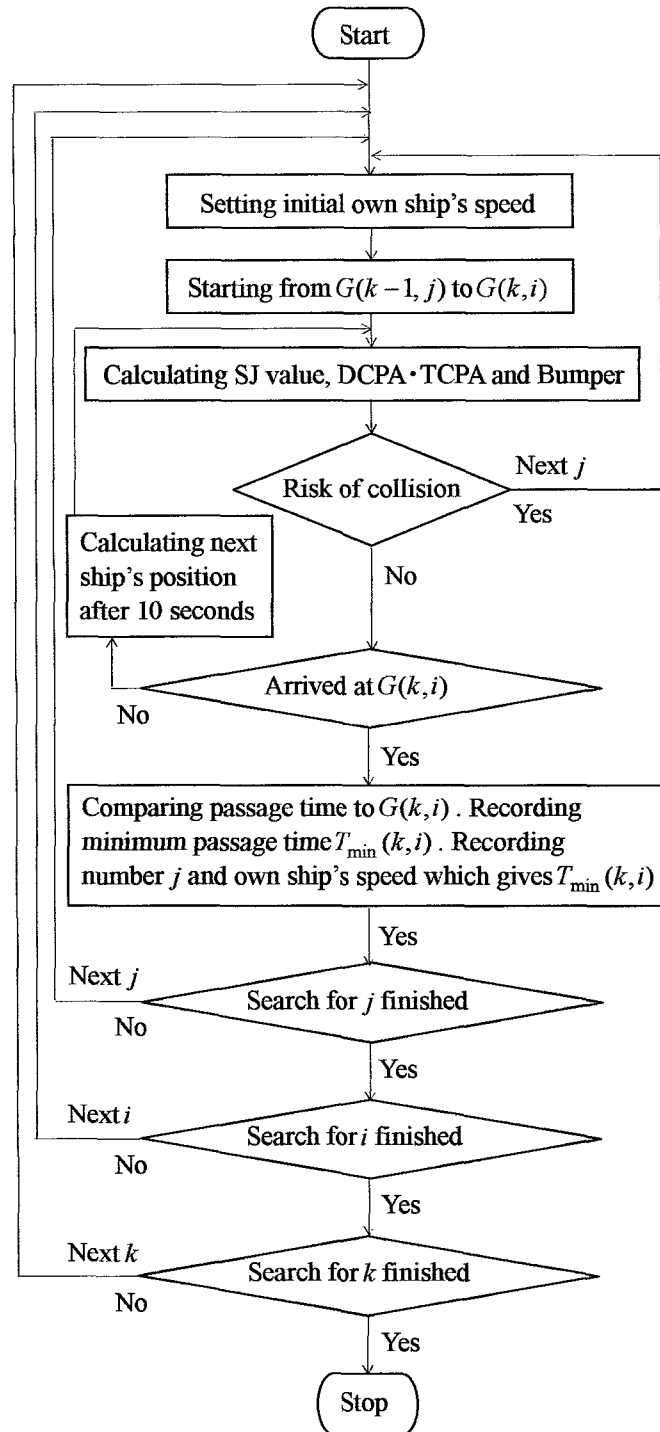


Fig. 4.3.1 Algorithm of calculating optimal route when own ship keeps its speed constant

Fig. 4.3.1 に示すアルゴリズムを用いて自船が複数の他船と出会う場合において、最適航路を計算した。シミュレーションでは、他船との横切りの場合は DCPA・TCPA を計算せずにバンパーと SJ 値のみを計算し、行き合いと追い越しの場合は SJ 値を計算せずにバンパーと DCPA・TCPA を計算し、それぞれの見合い関係別について衝突の危険判定を行う。SJ 値の制限値は -0.5 としたシミュレーション結果を Fig. 4.3.2 に示す。

Fig. 4.3.2 において自船の最適航路を太線で示す。細線は現在位置から各グリッドまでの最短時間航路である。このシナリオにおいて、すべての船舶の長さは 100 m、速力 12 knots とする。もし自船が A 船の前方を航過すると B 船と危険な遭遇となり、また A 船・B 船の後方を航過すると E 船・F 船と危険な見合い関係となるように他船の予定航路を設定した。

SJ 値の制限値を -0.5 とした場合の最適航路では、自船は C 船・E 船・F 船に対してはとても安全な航路となった。また、自船は制限値に極めて近い SJ 値で A 船の前方、そして B 船の後方を航過したことが分かった。最適航路の所要時間は 2224 秒であった。

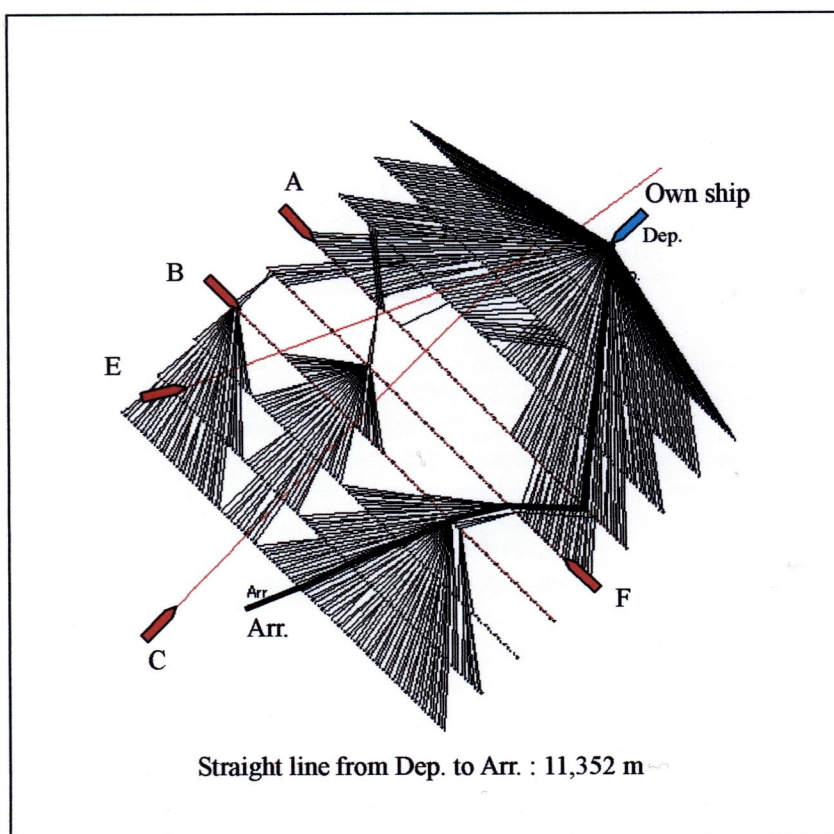


Fig. 4.3.2 The optimal route of own ship in case of keeping its speed constant

4.3.2 自船の減速を考慮した場合

船舶が輻輳する海域において、自船が航行する間に他船と危険な遭遇になった場合、自船の速力を落としグリッド間を再度航走させるシミュレーションを行った。Fig. 4.3.3 にはそのアルゴリズムを示す。

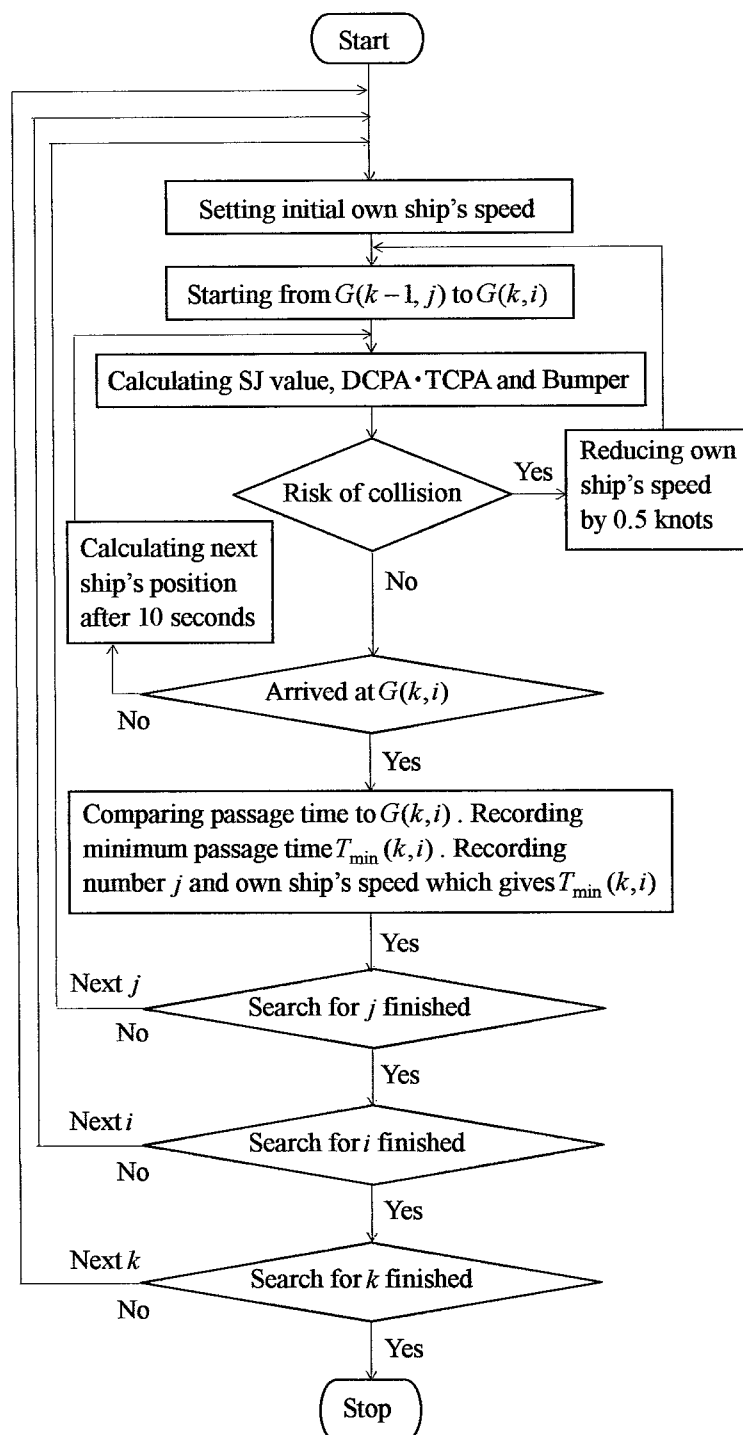


Fig. 4.3.3 Algorithm of calculating optimal route that own ship reduces its speed in case of dangerously encountering with target ships

Fig. 4.3.4 は、4.3.1 項で用いたシナリオを使ってシミュレーションを行った結果である。Fig. 4.3.4 に示した最適航路を見ると分かるように、減速を考慮する方法では航海所要時間が 2045 秒であり、Fig. 4.3.2 に示した自船の速力を一定にした場合に比べ 179 秒短く、かつ大幅な変針もなかった。したがって、減速を考慮する方がより有効であることが分かった。この最適航路では、自船は A 船の前方を安全な SJ 値で横切った。A 船を交わした後、F 船がすでに通過していたが、B 船と危険な遭遇となるので、自船の速力を 8.5 knots まで落とし B 船の後方を航過することになった。C 船・E 船とは横切りの関係であったが、安全に航過した。

また、航行時の自船および他船の SJ 値の変化を Fig. 4.3.5 に示す。Fig. 4.3.5 の上図を見ると、自船が A 船および B 船を SJ 値の制限値で航過したことが分かった。自船が A 船を航過するとき、A 船に対する自船の SJ 値は -0.499 であり、B 船を航過するとき、B 船に対する自船の SJ 値は -0.499 であった。なお、自船は 810 秒ごろ E 船に近づいたが、そこからは E 船と行き合いの関係となったので SJ 値を考慮せず、安全な DCPA で航過した。

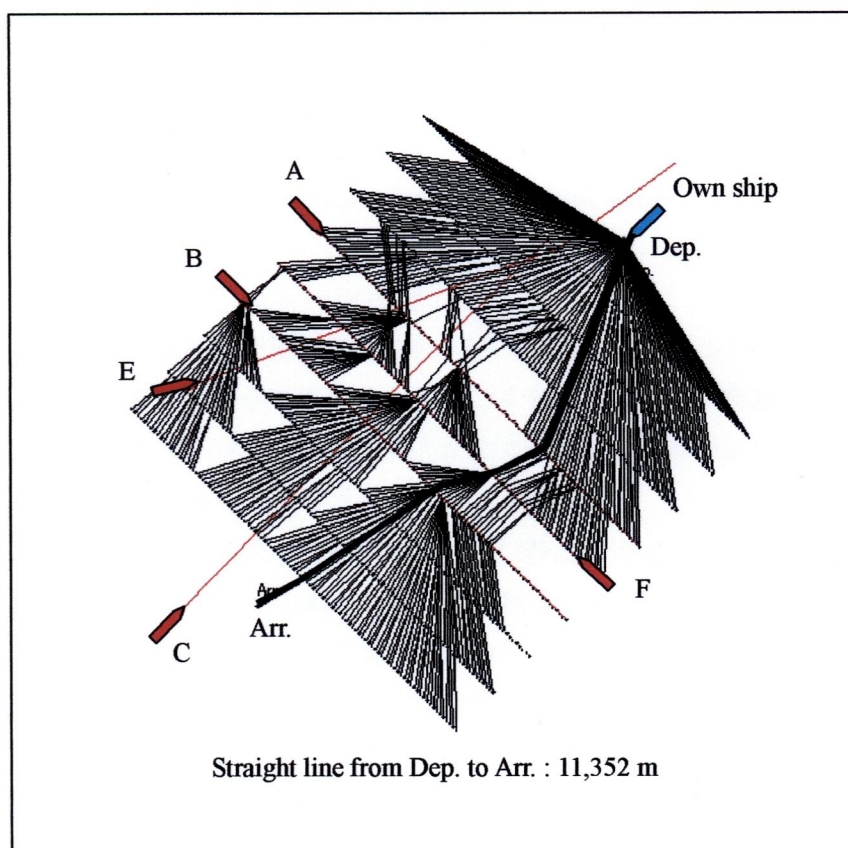


Fig. 4.3.4 The optimal route of own ship in case of reducing its speed

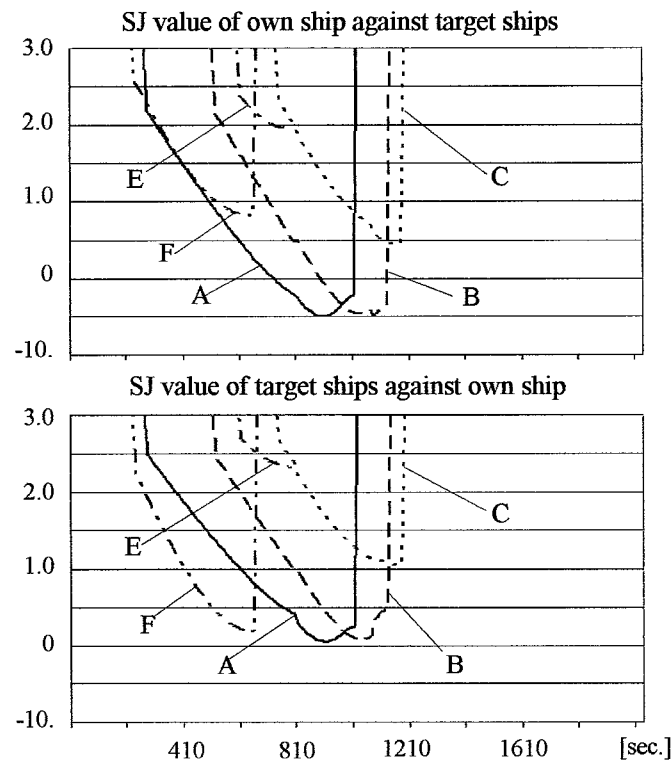


Fig. 4.3.5 Time histories of own and target ships' SJ value

4.3.3 AIS データを用いたシミュレーション

ここでは、開発した最適航路決定法の有効性を AIS データで検証するため、東京海洋大学の練習船「汐路丸」が館山湾で実験航海を行った間、AIS を搭載して東京湾を出入りする船舶の情報を入手した。取得したデータを解析することにより、船舶の実際の航行と同じようにシナリオを作成し、シミュレーションを行う。

まず、AIS は船舶の運航状態によって動的情報および静的情報を異なる時間間隔で送信するので、同時刻における各船の位置を求めるため、位置補間を行った。

次に、動的情報には船名、船長などが含まれないので、動的情報および静的情報の中に含まれる MMSI 番号を照らし合わせ、各船の船長を取得した。各船の同時刻のデータを用いて船舶の実際の航行を動画で再現し、危険な遭遇状態を選び出した。そして、各船の航跡をそれぞれの船舶の予定航路とし、動的情報の中に含まれる速力の平均値を自船の速力とした。

各船の予定航路を Fig. 4.3.6 に示し、船をバンパーで表示する。それぞれの船舶の情報を Table 4.3.1 に示す。これらの船舶の中で A 船という浦賀水道航路へ入航しようとするものを自船とする。

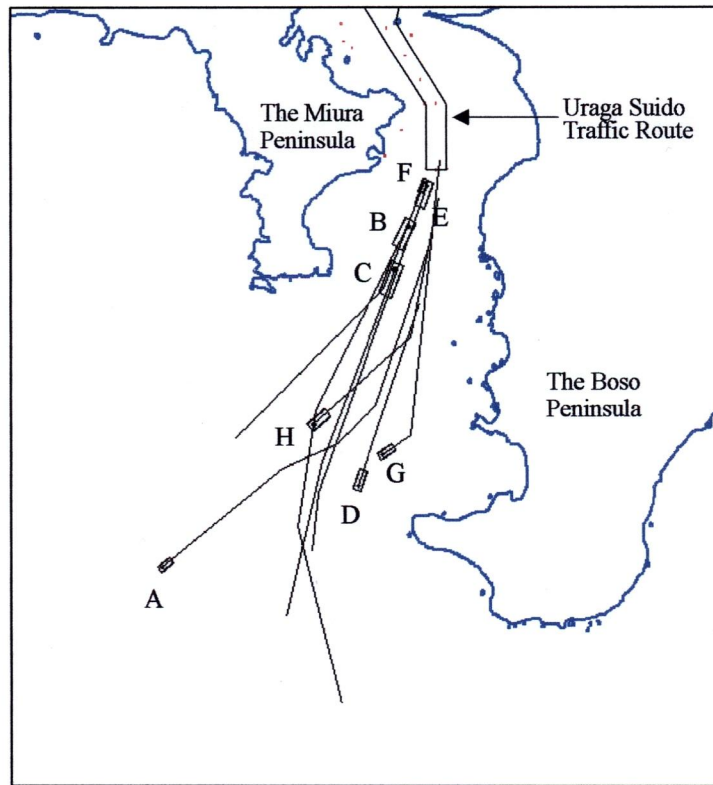


Fig. 4.3.6 Planned routes made from AIS data
(06:00 ~ 07:00, Dec. 01, 2004)

Table 4.3.1 Own ship and target ships' information

Ship name	Speed [knot]	Length [m]	Number of waypoints
A	19.7	162	5
B	21.3	294	4
C	15.2	333	3
D	8.0	200	2
E	16.2	262	3
F	16.9	131	3
G	14.9	183	3
H	13.0	235	3

自船は実際の航行において、B 船と C 船の前方を航過するとき、C 船のバンパーと重なり、危険な遭遇状態になった。自船の航行時間は 3480 秒であった。このような遭遇状態を用いて、SJ 値の制限値を -0.5 とした場合のシミュレーションを行い、自船の最適航路を求めた。SJ 値の制限値を -0.5 とした理由は、この海域が広くて船舶がお互いに避航しやすいからである。

シミュレーション結果を Fig. 4.3.7 に示す。求めた最適航路においては、自船は予め B 船、C 船および E 船が東へ、また F 船が西側へ向かうことが分かっているため、目的地まで真っ直ぐにかつ安全に航行することができた。特に、自船が B 船、C 船および F 船の予定航路情報を戦略的に考慮することにより、多くの変針で避航する必要がなくなった。自船の航行所要時間は 3314 秒であり、実際の航行時間に比べ 166 秒短かった。また、航行時の自船および他船の SJ 値の変化を Fig. 4.3.8 に示す。

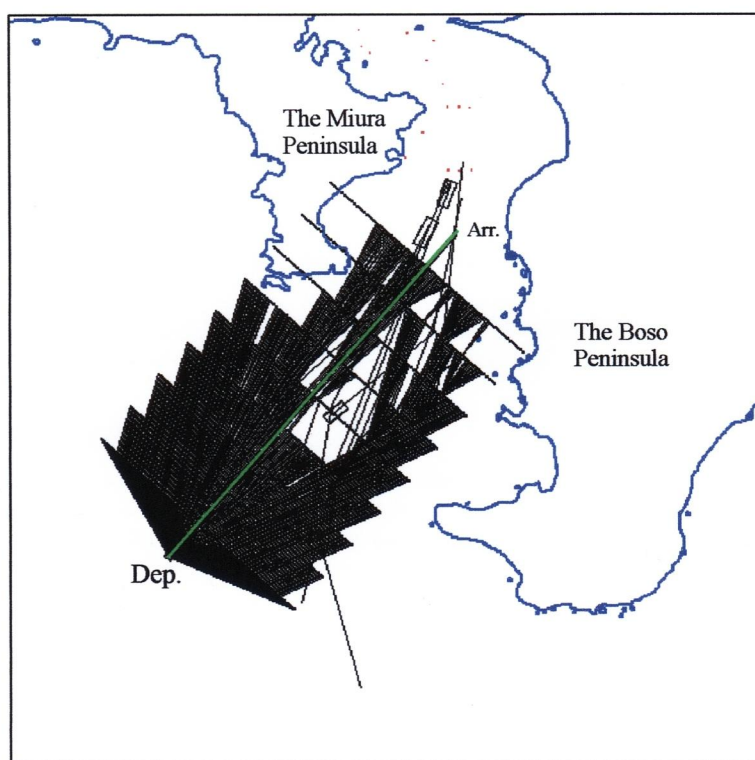


Fig. 4.3.7 The optimal route of own ship navigating toward Uruga Suido Traffic Route

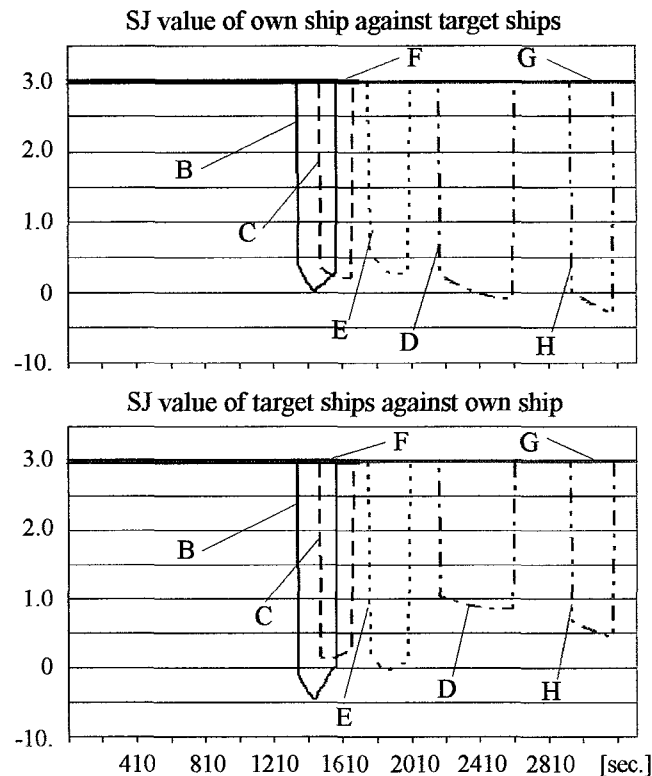


Fig. 4.3.8 Time histories of own and target ships' SJ value

Table 4.3.2 Dangerous time on the actual route of own ship

Type of Danger	Bumper overlapping	SJ value < -0.5
Time [sec]	220	430

Fig. 4.3.8 により、自船は C 船・D 船・E 船・G 船・H 船を非常に安全な SJ 値で航過した。B 船に対しては、Fig. 4.3.8 の下図をみると、自船が制限値に近い SJ 値で航過したことが分かった。F 船に対しては、1700 秒ごろから行き合いの関係となったので、SJ 値による衝突危険判定は行われずに、1154 m の DCPA で航過した。

なお、Table 4.3.2 に示すように、自船が実際の航路を航行する場合は、自船のバンパーが他船のバンパーと重なった時間は 220 秒間、他船もしくは自船の SJ 値が -0.5 以下になった時間は 430 秒間である。これに対して、最適航路では、自船と他船のバンパーが重なることなく SJ 値が制限値以下にならず、安全にかつ最短時間で航行することができた。

さらに、浦賀水道航路を出航する船舶のシミュレーションを次に示す。

上記のように AIS データを基に船舶の実際の遭遇状態を再現し、危険な見合い関係を見出してシナリオを作成した。本シミュレーションに用いるシナリオを Fig. 4.3.9 に、それぞれの船舶の情報を Table 4.3.3 に示し、A 船を自船とする。

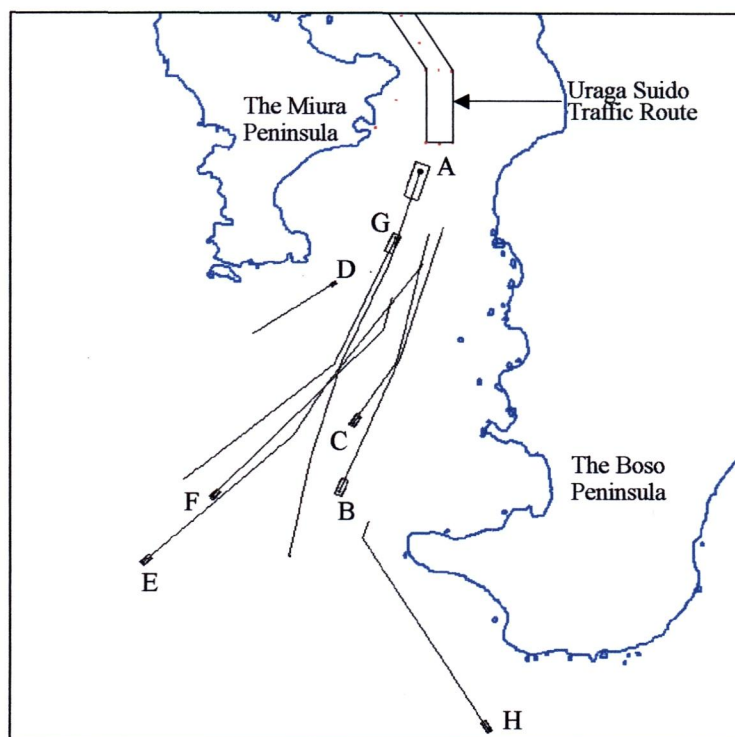


Fig. 4.3.9 Planned routes made from AIS data
(22:00 – 22:56, Feb. 26, 2005)

Table 4.3.3 Own ship and target ships' information

Ship name	Speed [knot]	Length [m]	Number of waypoints
A	12.3	308	5
B	12.1	151	3
C	14.2	112	3
D	12.5	59	2
E	12.6	103	5
F	10.8	91	3
G	13.3	170	3
H	12.6	103	3

実際の航行においては、自船は浦賀水道航路を出て南航している際に、航路に入航しようとする F 船が自船の前方の近くを横切り、その直後 E 船も自船の前方を横切ろうとしたが、危険な遭遇になるので、自船の後方を航過した。F 船と E 船が通過してから自船は目的地へ向かい、航行時間が 4338 秒であった。

同じく SJ 値の制限値を -0.5 とした場合のシミュレーションを行い、結果を Fig. 4.3.10 に示す。Fig. 4.3.10 に示すように、実際に自船が航行した海域は最短時間航路群が存在せず、危険な海域であることが分かった。最短時間航路群が存在しない場所とは、もし自船がその海域を航行すると予め定めた安全条件を満たせないところである。最適航路の航行所要時間は 4331 秒で、実際の航行所要時間と殆ど差はなかった。しかし、最適航路では自船は E 船と F 船の予定航路情報が分かったため、早めに左転することによりこれらの船舶を安全にかわすことができた。

なお、航行時の自船および他船の SJ 値の変化を Fig. 4.3.11 に示す。Fig. 4.3.11 により、自船は D 船・E 船・G 船・H 船を非常に安全な SJ 値で航過した。F 船に対しては Fig. 4.3.11 の上図をみると、自船が近づいたとき F 船に対する自船の SJ 値が制限値に極めて近い値となったことが分かった。しかし、B 船・C 船に対してはそれぞれ 1420 秒と 980 秒ごろから行き合いの見合い関係となったので、SJ 値による衝突危険判定は行われずに、自船は B 船と 2271 m の DCPA で、そして C 船と 1920 m の DCPA で航過することになった。

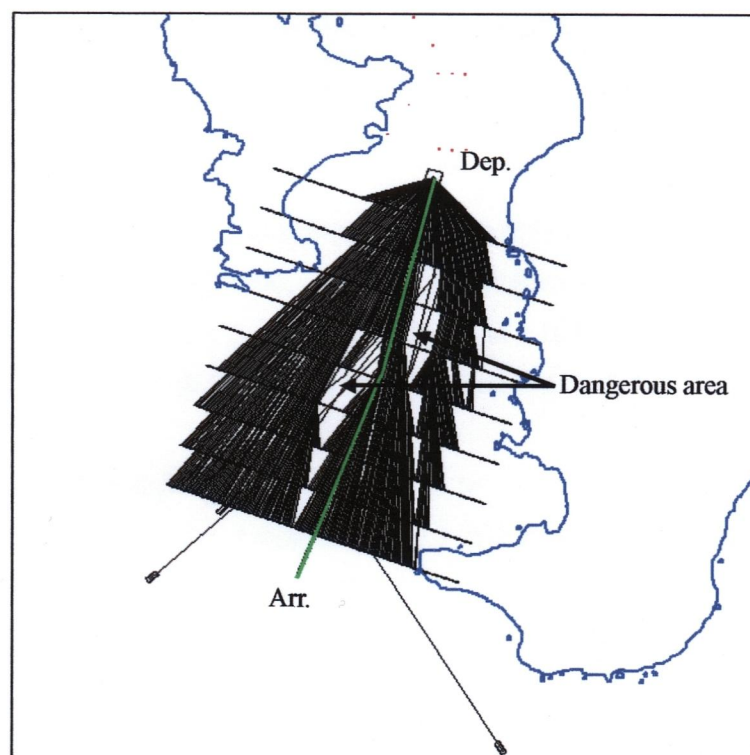


Fig. 4.3.10 The optimal route of own ship (SJ value > -0.5)

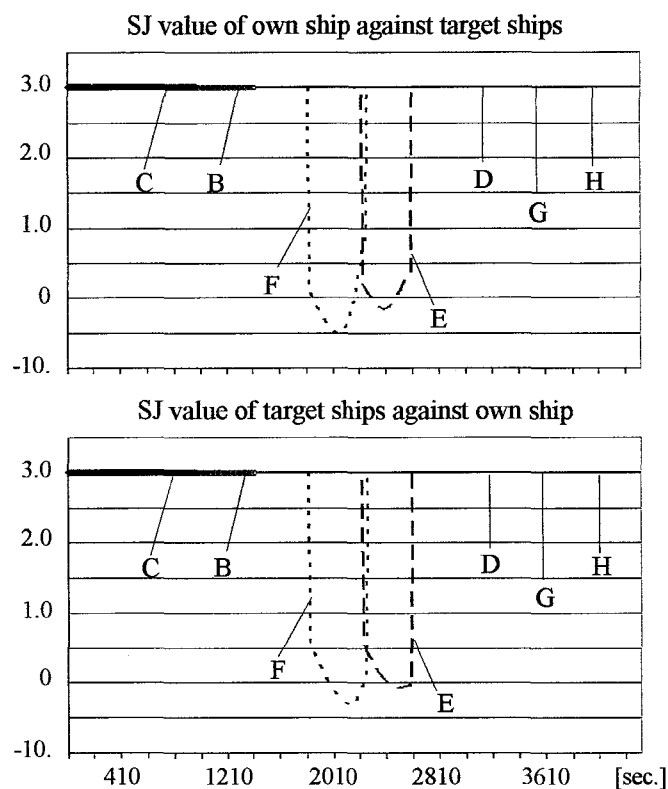


Fig. 4.3.11 Time histories of own and target ships' SJ value

Table 4.3.4 Dangerous time on the actual route of own ship

Type of Danger	Bumper overlapping	SJ value < -0.5
Time [sec]	460	710

また、Table 4.3.4 に示すように、自船が実際の航路を航行する場合、自船のバンパーが他船のバンパーと重なった時間は 460 秒間、他船もしくは自船の SJ 値が -0.5 以下になった時間は 710 秒間である。これに対して、最適航路では、自船と他船のバンパーが重なることなく、SJ 値が制限値以下にならず、安全にかつ早く航行することができた。

4.3.4 レーダ観測データを用いたシミュレーション

本研究に用いるレーダ観測による船舶交通データは東京海洋大学の東京湾リモートレーダネットワークシステムにより得られたものである。

レーダ観測データの解析により、横浜沖の海域では中ノ瀬航路や浦賀水道航路北航レーンを抜けて横浜方面に向かう船舶と東京方面から南下して来た船舶とが危険な横切り関係となるために、この海域について本研究に開発したプログラムの有効性を検証する⁽¹⁵⁾。

Table 4.3.5 はレーダ観測データの解析により得られた長さ 70 m 以上の船の情報を示し、A 船を自船とする。各船の航跡を予定航路とし、船をバンパーモデルで Fig. 4.3.12 に示す。

Table 4.3.5 Own ship and target ships' information

Ship name	Speed [knot]	Length [m]	Number of waypoints
A	10.5	173	6
B	10.1	72	4
C	13.2	111	4
D	12.4	72	3
E	13.6	95	2
F	13.9	81	3
G	12.3	72	3
H	5.1	144	4

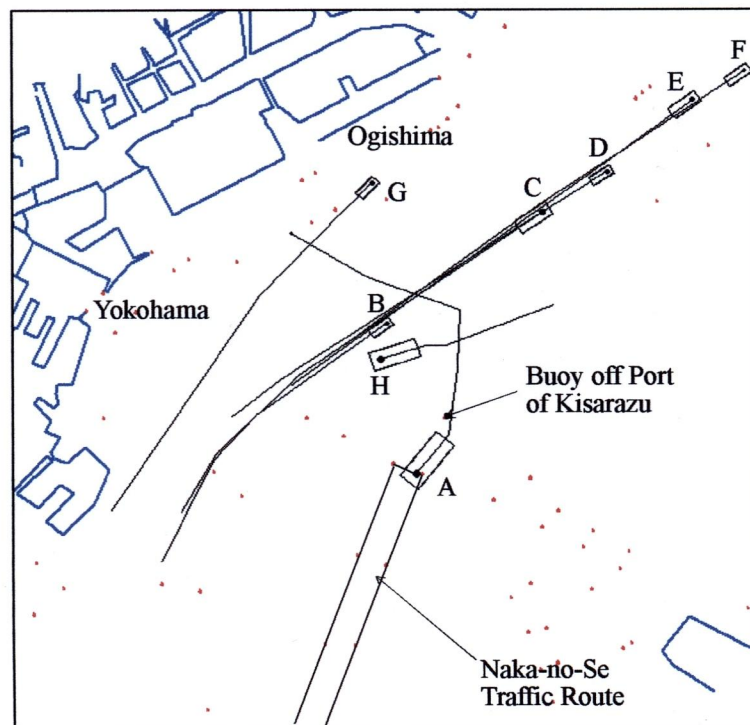


Fig. 4.3.12 Planned routes of ships made from radar observation
(13:31~ 13:58, May 27, 2004)

Fig. 4.3.12 に示すように、実際の航路においては、自船は中ノ瀬航路を出てしばらくそのままの針路で航行し、木更津沖のブイを通過した後、左転し扇島沖へ向かうところで H 船と危険な遭遇となり、自船が法律上保持船であるため H 船の前方を通過した。その後、南航する D 船と E 船の間通過してから目的地へ向かった。自船の航行時間は 1620 秒であった。

この遭遇状態を用い、SJ 値の制限値を -1.0 とした場合のシミュレーション結果を Fig. 4.3.13 に示す。ここで SJ 値の制限値を -1.0 としたのは東京湾内での航行においては、操船者が湾外に比べ常に衝突の危険を感じながら慎重に操船を行うからである。最適航路計算では、南航する他船の予定航路・速力情報が分かるため、自船は B 船が自船の前方を横切ってから、B 船と C 船の間を航行し、目的地へ向かった。航行の所要時間は 1240 秒であり、実際の航海時間より 380 秒短かった。また、自船の減速を考慮したシミュレーションも行ったが、SJ 値の制限値が -1.0 の最適航路は減速しない場合と全く同じものとなったので、ここに示さない。この遭遇状況には横切りの見合い関係しかなかったので、DCPA・TCPA による衝突危険判定は行われなかった。

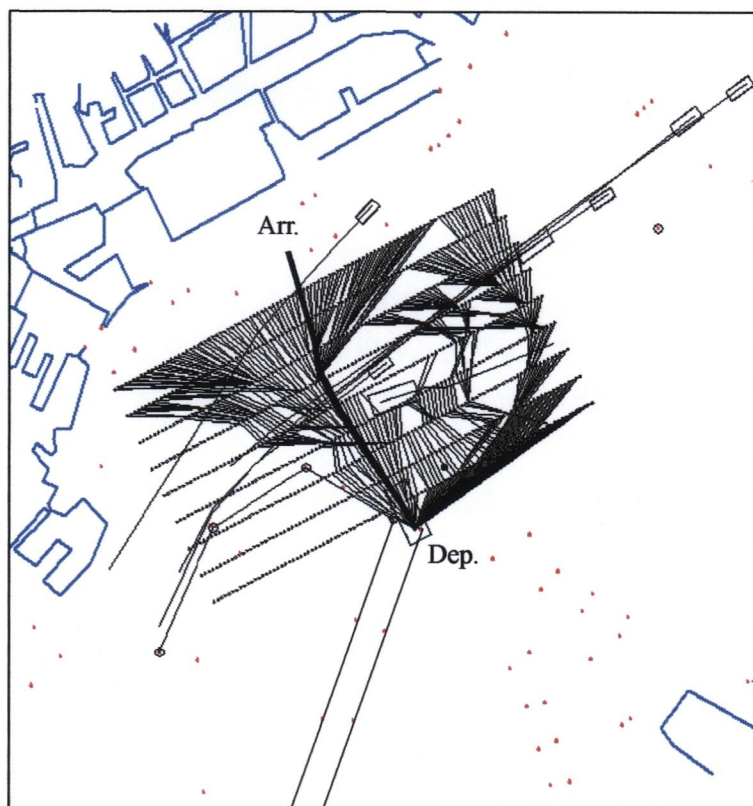


Fig. 4.3.13 The optimal route in case of constant own ship's speed
(SJ value > -1.0)

Table 4.3.6 Dangerous time on the actual route of own ship

Type of Danger	Bumper overlapping	SJ value < -1
Time [sec.]	540	360

Table 4.3.6 に示すように自船が実際の航路を航行する場合は、自船のバンパーが他船のバンパーと重なった時間は 540 秒間、他船もしくは自船の SJ 値が -1.0 以下になった時間は 360 秒間である。これに対して、最適航路では、自船と他船のバンパーが重なることなく SJ 値が制限値以下にならず、安全に航行することができた。つまり、最適航路を航行することによって、自船が各船舶と遭遇する以前に、海域全体において各船舶を安全かつ効率的に避航する戦略的避航を計画できた⁽¹⁶⁾。

次に ATMS システムに参加する船舶は DP を用いてどのように自分の最適航路を求めるかについて述べる。

4.4 交通管理を行う海域を航行する全船の最適航路決定法

最適航路を求めるための手法は 4.1.2 項に説明したように前進型 DP を用いる。ただし、実際の操船では減速することが多いので、自船の減速を考慮するアルゴリズムを採用する。また、DP の第一回目の計算で出発時の速力で航行しても安全に予定到着地に到達できない場合は初速を 1 knot ずつ落として再計算を行うものとする⁽¹⁷⁾。

任意の海域に ATMS システムを導入する場合、後でシステムに参加する船舶がすでにシステムに入っている船舶の予定航路を考慮し、DP により自船の最適航路を計算するという「先船優先条件」を設定する。

例えば、A 船、B 船、C 船が Fig. 4.4.1 に示すような航路に沿って航行しようとする。Fig. 4.4.1 には各船の周囲にバンパーが描かれている。各船はこれらの航路を航行すれば Fig. 4.4.2 に示すように、10 分後に危険な見合い関係が発生している。仮に、これからこの海域に ATMS システムを導入したとして、A 船、B 船そして C 船という順にシステムに入ったとする。まず A 船が一番先にシステムに参加するため、「先船優先条件」で他船を考慮する必要がなく、真っ直ぐに航行することになる。Fig. 4.4.3 に示すように、2 番目にシステムに参加する B 船が A 船のみを避けて自船の最適航路を計算し、航行することになる。最後にシステムに参加する C 船は、Fig. 4.4.4 に示すように A 船、B 船の予定航路を考慮しながら、自船の最適航路を計算することとなる。

システムを導入した結果、Fig. 4.4.2 と Fig. 4.4.5 を比較すると各船が最適航路を航行することによって、3 船による危険な多重遭遇がなくなり、海域における交通の安全性が改善されたと考えられる。

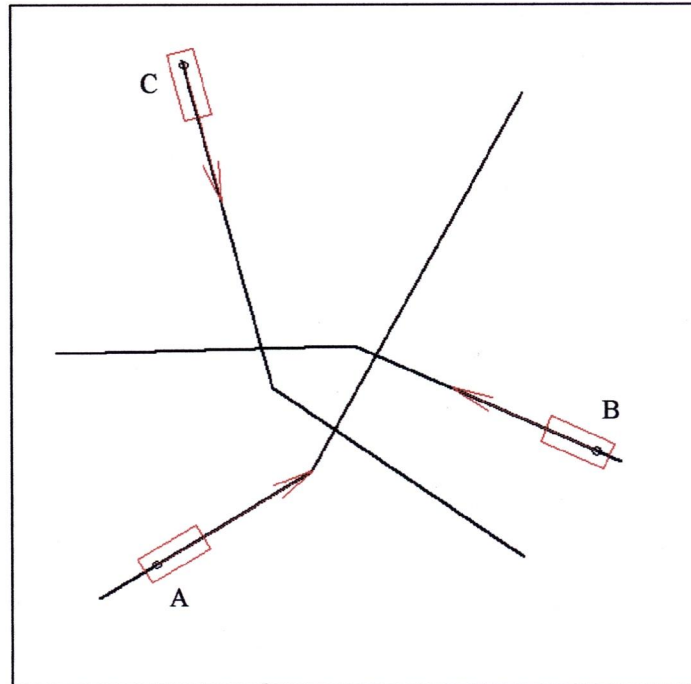


Fig. 4.4.1 Planned routes of A, B and C ship before introducing ATMS

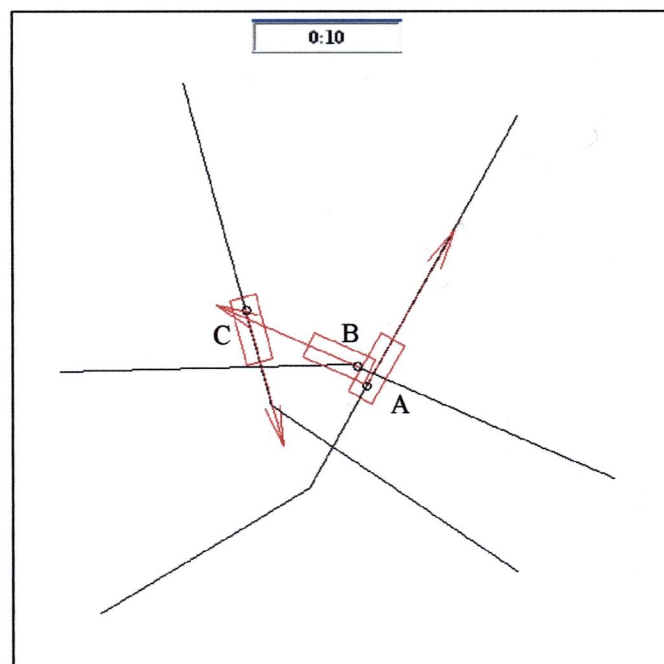


Fig. 4.4.2 Dangerous multi-encounters of A, B and C ship on the actual routes

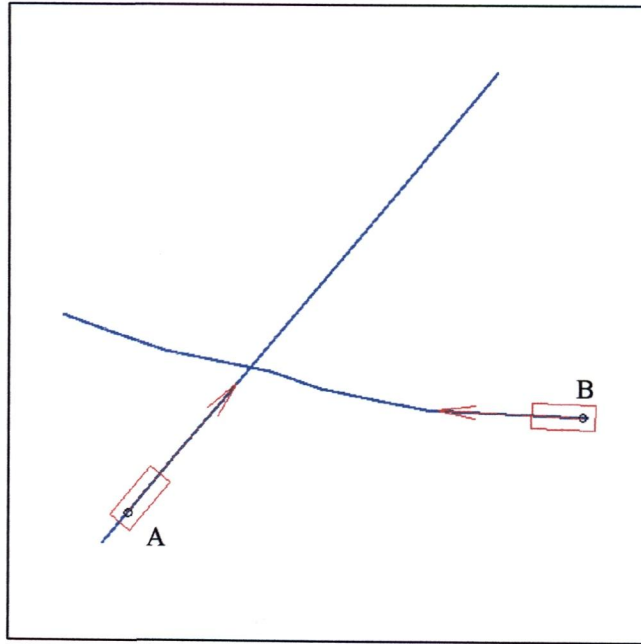


Fig. 4.4.3 The optimal routes of A and B ship in case of introducing ATMS

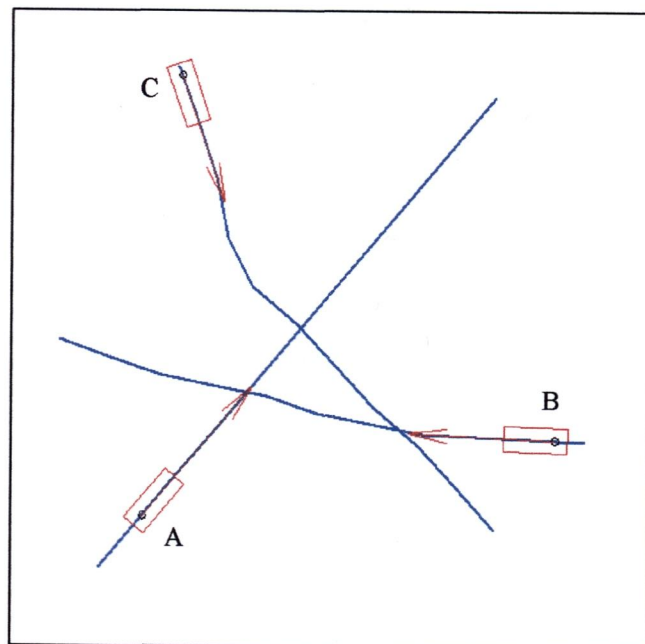


Fig. 4.4.4 The optimal routes of A, B, and C ship in case of introducing ATMS

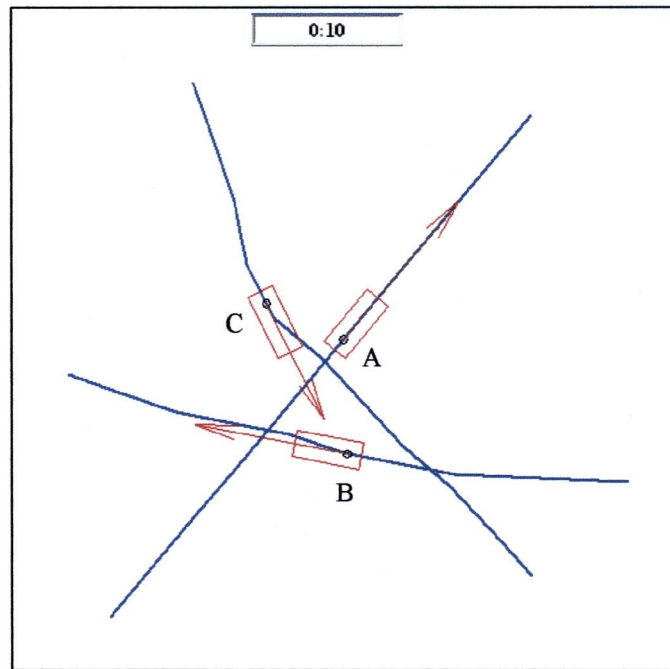


Fig. 4.4.5 Safe multi-encounters of A, B and C ship on the optimal routes

第5章 交通管理海域における安全性・効率性の評価

ここでは、ATMS システムの有効性を検証するための第一段階として、ATMS を導入する前に海域の交通がどのような状態にあるかについて交通評価を行う。本研究に使用する船舶交通データは AIS およびレーダ観測によるものである。AIS データは東京湾の入り口付近の海域で取得したものであり、レーダ観測データは東京海洋大学のリモートレーダネットワークシステムにより得られたものである。それぞれの海域については一般に用いられている交通評価指標および本研究で提案する指標で交通評価を行う。

5.1 交通評価手法

海域の交通を評価するために、まずは、既存の交通評価指標であるバンパーモデル、SJ 値、DCPA・TCPA による危険船舶の密度分布図を用い、危険な遭遇が発生する海域を示す。危険船舶の密度は式 (5.1.1) によって計算する。

$$Density = \frac{\sum_{k=1}^n DS_k}{t} \quad (5.1.1)$$

Density : 危険船舶の密度

DS_k : あるメッシュに入る k 番の危険船舶

t : 観測を行った回数

n : 船舶の隻数

式 (5.1.1) を用いて 4.4 節に述べた遭遇状態についてバンパーモデルによる危険船舶の密度を計算し、その結果を Fig. 5.1.1 に示す。Fig. 5.1.1 に示すように、濃い色のエリアはバンパーモデルによって判断された危険船舶の密度が高いところである。また、SJ 値および DCPA・TCPA による評価についてもこのように行う。

なお、ある一隻の船が同時に複数の他船と危険な遭遇となった場合は、多重遭遇と見なし、遭遇した他船の数を自船の危険船舶数とする。これは、実際に自船が一隻に対する衝突の危険性を感じるのは同時に複数の船舶に対する衝突の危険性を感じるのと違うからである。例として Fig. 5.1.2 に示すような場合においては、自船が同時に 2 隻の他船とバンパーが重なっているので、自船が多重遭遇となり自船に対して 2 隻の危険船舶と数える。

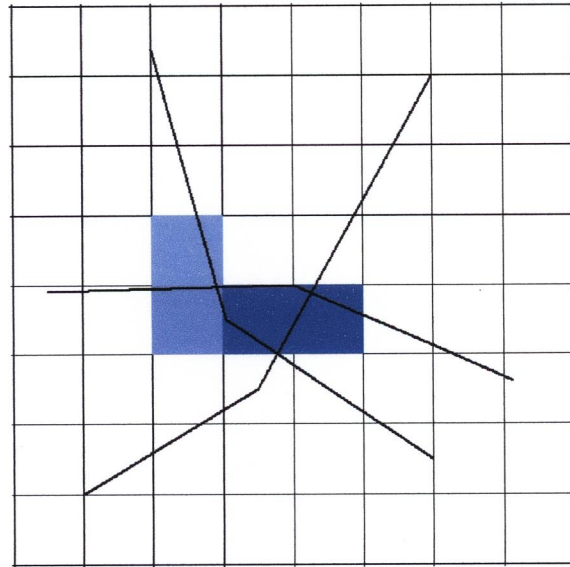


Fig. 5.1.1 Density distribution of dangerous ships judged by Bumper Model

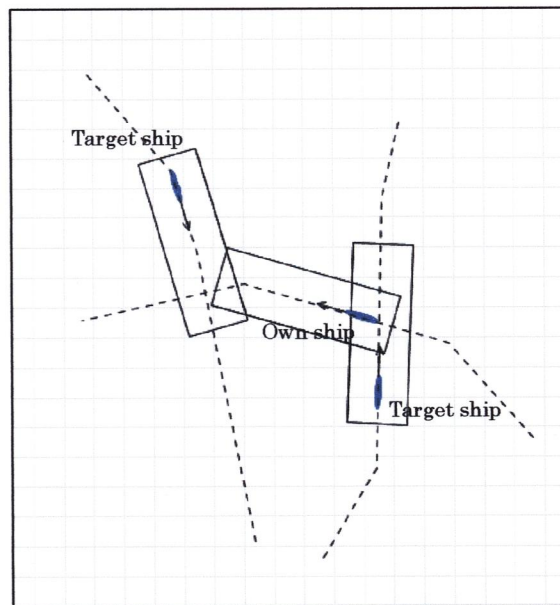


Fig. 5.1.2 Sample of dangerous multi-encounters judged by Bumper Model

次は、海域全体の安全性を評価するために、各船が航行中、衝突の危険が発生した時間を全船について合計し、それを各船の航海時間の合計で割った値を危険率 R_d として定義し、式(5.1.2)に示す。

$$R_d = \frac{\sum_{k=1}^n Td_k}{\sum_{k=1}^n T_k} \quad (5.1.2)$$

Td_k : k 番船に衝突の危険が発生した時間
 T_k : k 番船の航海時間
 n : 船舶の隻数

また、交通の効率性については、式 (5.1.3) に示すように実際の総航海時間と最適航路の総航海時間との差を実際の総航海時間で割ったものを用いて評価する。

$$\frac{\sum_{k=1}^n (Tac_k - Top_k)}{\sum_{k=1}^n Tac_k} \quad (5.1.3)$$

Tac_k : k 番船の実際の航海時間
 Top_k : k 番船の最適航路の航海時間

5.2 東京湾の入り口付近における AIS データによる交通評価

開発している ATMS システムの有効性を評価する第一段階として、システムを導入する前の海域の交通評価を行う。まずは、東京湾の入り口付近において、東京海洋大学練習船「汐路丸」が館山湾で実験航海を行った間（2006 年 4 月 27 日午前 01:45 から 06:18 まで）に AIS データを受信した。

取得した AIS データを解析した結果により、この海域では朝方に多くの船舶が入湾するため、この時間帯において船舶の交通が輻輳することが分かった。Fig. 5.2.1 は受信した AIS 搭載船舶の航跡を一分毎にプロットした図である。全船（合計 31 隻）の動的情報（位置情報）に基づき、それぞれの船舶の実航路を作成したものを Fig. 5.2.2 に示す。Fig. 5.2.2 が示すように、作成した各船の実航路は日本船長協会の自主設定の分離通航帯の入り口付近までとし、この海域について交通評価を行う。その理由は、分離通航帯における交通は整流されていて危険な遭遇があまりないからである。なお、交通評価を行うためには、動的情報から速力情報を取り出し静的情報から全船の船長を求めた。全船の長さおよび平均速力を Table 5.2.1 に示す。

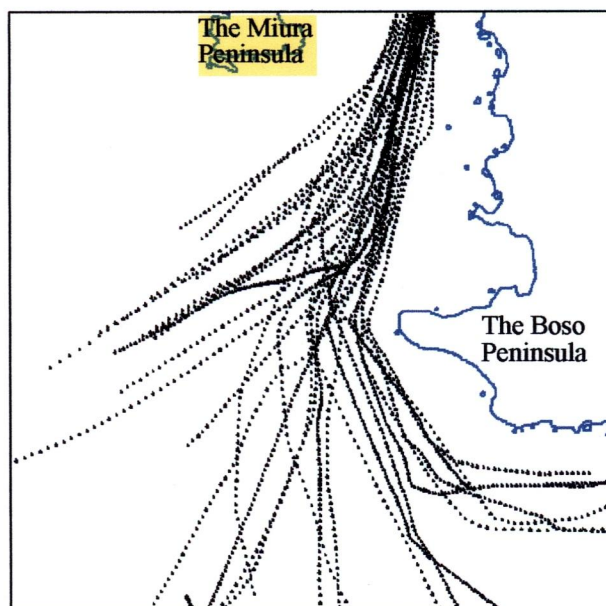


Fig. 5.2.1 The tracks of all ships plotted every one minute obtained from AIS
(Total of ships: 31 ships, 01:45 ~ 06:18, Apr. 27th, 2006)

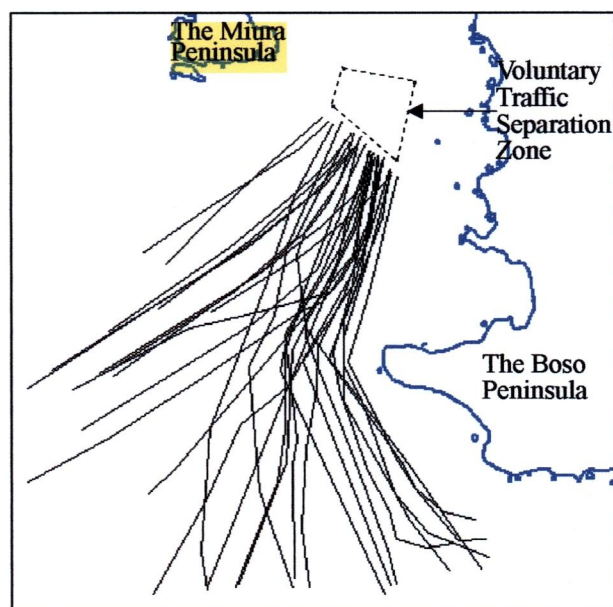


Fig. 5.2.2 The actual routes of all ships obtained from AIS

Table 5.2.1 Length and speed of ships used in simulation

Ship number	Length of ship [m]	Average speed [knot]
1	103	15.44505965
2	130	17.74494654
3	169	10.62582437
4	105	14.98177103
5	161	10.0132457
6	161	17.26863897
7	190	14.43164319
8	300	14.6163301
9	113	12.63580313
10	299	11.19266684
11	147	13.91764773
12	167	23.37497077
13	112	14.09588158
14	125	12.71301255
15	68	12.0968303
16	200	16.68180862
17	138	12.03484407
18	70	16.52818472
19	294	18.56637423
20	96	9.678590439
21	145	17.67285288
22	123	13.75445394
23	110	9.425517494
24	104	12.92973396
25	104	15.19259999
26	100	12.61895075
27	199	18.72933131
28	165	16.35242809
29	123	14.7247614
30	70	9.865149822
31	86	13.72540077

この海域は浦賀水道航路以北の東京湾内と比べて広いので、SJ 値が -0.5 以下になった場合および Fig. 4.2.1 に示したバンパーが重なった場合を危険な遭遇と見なす。式 (5.1.1) また式 (5.1.2) を用いて、危険船舶の密度および海域の危険率を計算し、その結果は次のようになった。

まず、式 (5.1.1) により SJ 値で判断した危険船舶の密度を計算し、Fig. 5.2.3 に示す。Fig. 5.2.3 が示すように、日本船長協会の自主設定の分離通航帯の入り口付近では、朝方に多くの船舶が浦賀水道航路に入るため、危険船舶の密度が一番高くなり、その値は 0.051 ship/km^2 であった。次に高い密度となったエリアは洲埼の西海域であった。これは、西側からの船舶が早めに分離通航帯の北航レーンに進入したいので東側からの船舶と出会ったことによる。

次に、バンパーモデルで交通評価を行う。バンパーが重なった危険船舶の密度分布図を Fig. 5.2.4 に示す。Fig. 5.2.4 が示しているように、SJ 値による危険船舶の密度分布と同様に分離通航帯の入り口付近でバンパーが数多く重なったことが分かった。最高の密度は 0.024 ship/km^2 であった。これはやはり船舶が集中して航路に入るからである。

さらに、Fig. 5.2.5 に DCPA・TCPA による危険船舶の密度分布を示す。Fig. 5.2.5 が示すように、危険とされたところは二つとなっている。一つは船舶が分離通航帯の入り口付近に集中したからであり、もう一つは西側からの船舶が東側からの船舶と横切りに近い見合い関係となったからである。

海域の危険率に関しては式 (5.1.2) を用いて計算し、Table 5.2.2 にまとめる。Table 5.2.2 が示すように、この海域において、まず、SJ 値によって判定される危険率は 18.20% にも上がった。つまり、式 (5.1.2) から分かるように短い航海でありながら、多くの船舶が危険な遭遇状態に長く置かれたと考えられる。次に、バンパーモデルによって危険な遭遇と判定された場合の危険率は 4.11% となった。また、DCPA・TCPA によって危険な遭遇と判定された場合の危険率は 0.67% という結果が得られた。DCPA・TCPA による危険率が一番小さかったのは、この海域においてこの時間帯には横切りの見合い関係が少なかったからである。

Table 5.2.2 The dangerous rates on the actual route

Type of danger	Dangerous rate
SJ value < -0.5	18.20%
Bumper overlapping	4.11%
DCPA・TCPA	0.67%

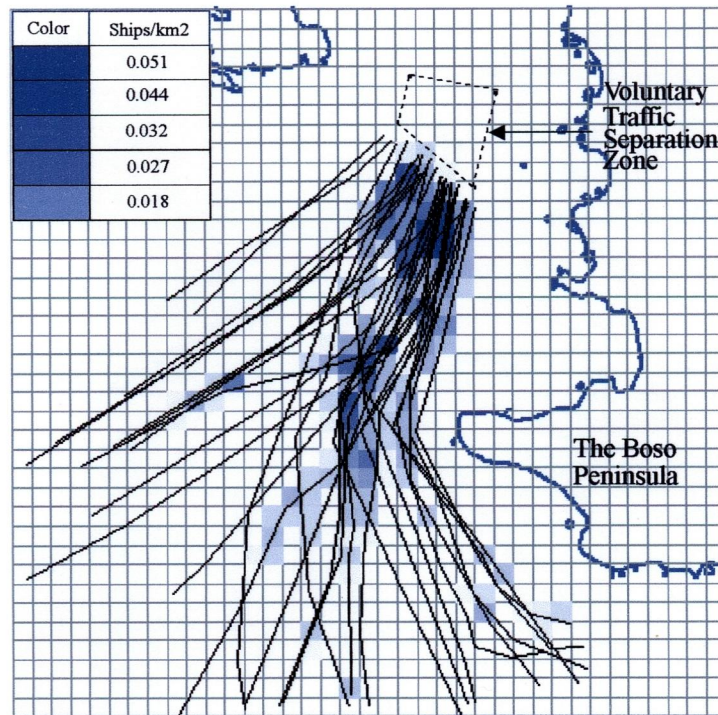


Fig. 5.2.3 Distribution of dangerous ships on the actual routes judged by SJ value

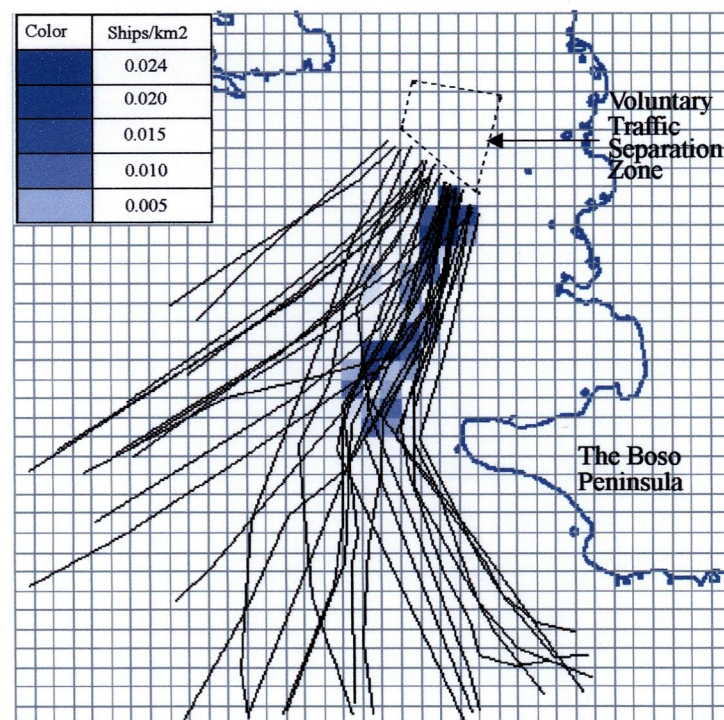


Fig. 5.2.4 Distribution of dangerous ships on the actual routes judged by Bumper Model

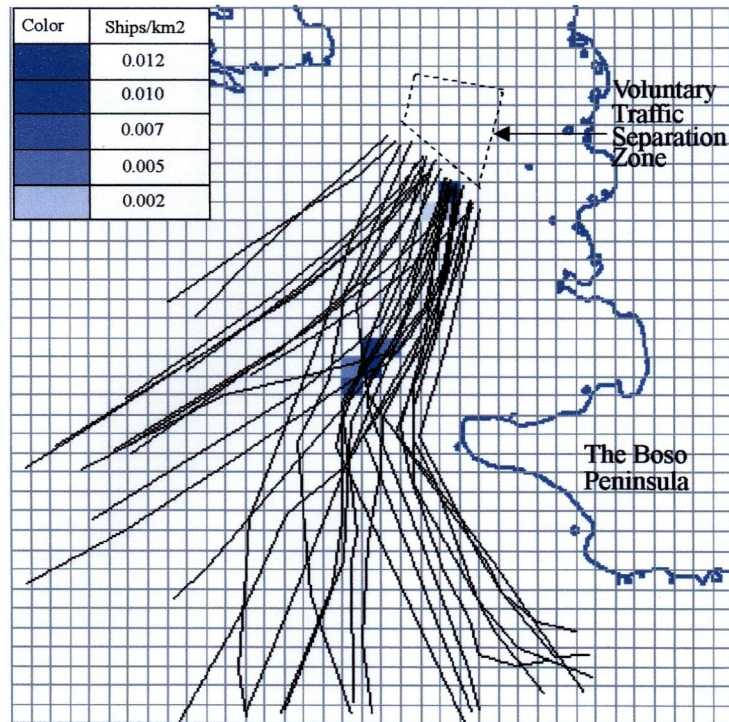


Fig. 5.2.5 Distribution of dangerous ships on the actual routes judged by DCPA・TCPA

5.3 レーダ観測データによる東京湾内の交通評価

ここでは、東京湾の入り口付近より船舶が輻輳する海域に ATMS システムを導入することにより交通の安全性がどの程度改善されるかを検証するために、東京東水路から浦賀水道航路北側出入り口の間の船舶交通データを用いて交通評価を行う。

現在 AIS を搭載して東京湾内を航行する船舶は一日約 100 隻程度のため、現状では AIS 搭載船のみで海域の交通を評価することは不適切だと考えられる。そこで、第 4 章 4.3.4 項に述べたように、東京湾リモートレーダネットワークシステムにより得られた長さ 70 m 以上の船舶を AIS 搭載船と仮定し、交通評価およびシミュレーションに用いることにした。

これらの船舶の実際の航跡を Fig. 5.3.1 に示す。観測期間は 2006 年 04 月 06 日 00:00 ~ 23:59 までで、船の数は 454 隻であった。船舶交通の特徴を調べるために一日中の航跡を Fig. 5.3.2 に示すような分け方で午前と午後に分ける。この分け方では、午前中から午後にかけて航行する船舶は両方の航跡図に存在することになる。Fig. 5.3.3 に午前中の航跡を、Fig. 5.3.4 に午後の航跡を表示する。Fig. 5.3.3 と Fig. 5.3.4 より午前中に中ノ瀬航路を出て北航する船舶と午後に東京・千葉方面から南航する船舶が多いことが分かる。また、船の長さについては、Table 5.3.1 に示す 91 隻はレーダ観測の間に AIS 受信機により得られた実船長を採用し、残りの船はレーダ画面における船舶映像の画素数から推定されたものを使う。船速は 1 分毎のレーダ観測データにより求める。なお、中ノ瀬航路内では船舶交通が整流されているため、本研究では航路内を ATMS 導入の対象外として航路内の航跡を考慮しないことにした。

Table 5.3.1 Ships having AIS data during radar observation

Ship no.	AIS length	Length estimated from radar	Ship no.	AIS length	Length estimated from radar
4187	199	241.2803	4791	135	154.4087
4195	129	186.4459	4807	111	119.431
4198	117	89.21732	4816	150	162.5814
4199	117	133.3445	4830	91	90.60849
4205	110	128.9994	4833	285	81.10345
4206	283	384.0558	4867	190	221.0827
4262	135	146.0136	4870	211	278.4405
4264	285	275.3285	4882	294	351.3877
4268	149	143.4822	4893	129	91.39385
4278	146	109.466	21805	283	86.94262
4280	146	191.6667	21815	104	122.3009
4283	86	106.8335	21824	168	161.0437
4286	188	163.3958	21826	108	90.00893
4287	140	104.0172	21827	108	143.8332
4291	317	294.9368	21831	130	155.8453
4294	108	265.6211	21855	208	244.0624
4296	153	116.2947	21861	275	124.5581
4299	201	185.2016	21865	275	243.1877
4300	108	137.604	21879	70	85.92461
4302	94	164.0046	21892	300	389.2774
4304	148	111.7981	21893	94	99.32354
4305	75	224.1594	21895	100	148.859
4329	104	108.8288	21923	70	85.74327
4349	105	102.9884	21970	144	148.0382
4353	70	70.41055	21985	86	194.5329
4366	183	84.27896	22013	110	133.5636
4392	121	115.5441	22024	138	70.79347
4396	91	105.9581	22044	146	169.5179
4425	71	81.02536	22091	193	117.6547
4444	183	195.3958	22092	98	86.049
4447	121	81.57232	22138	112	154.6645
4458	103	113.8364	22145	96	115.2968
4475	153	175.9767	22152	91	82.58404
4535	165	196.6825	22153	108	119.5782
4573	330	71.57072	22189	117	177.6766
4596	149	174.7515	22196	120	102.3971
4610	183	200.2153	22261	115	99.7585
4656	73	89.99686	22318	72	93.63594
4657	124	119.2482	22342	104	99.38676
4666	190	176.739	22361	72	88.93072
4696	80	106.6537	22379	293	81.76799
4724	161	187.0974	22383	71	86.44865
4740	119	140.5592	22390	71	91.45504
4752	104	128.2633	22402	80	135.6363
4770	99	97.34035	22428	137	217.0829
4787	294	359.6728			

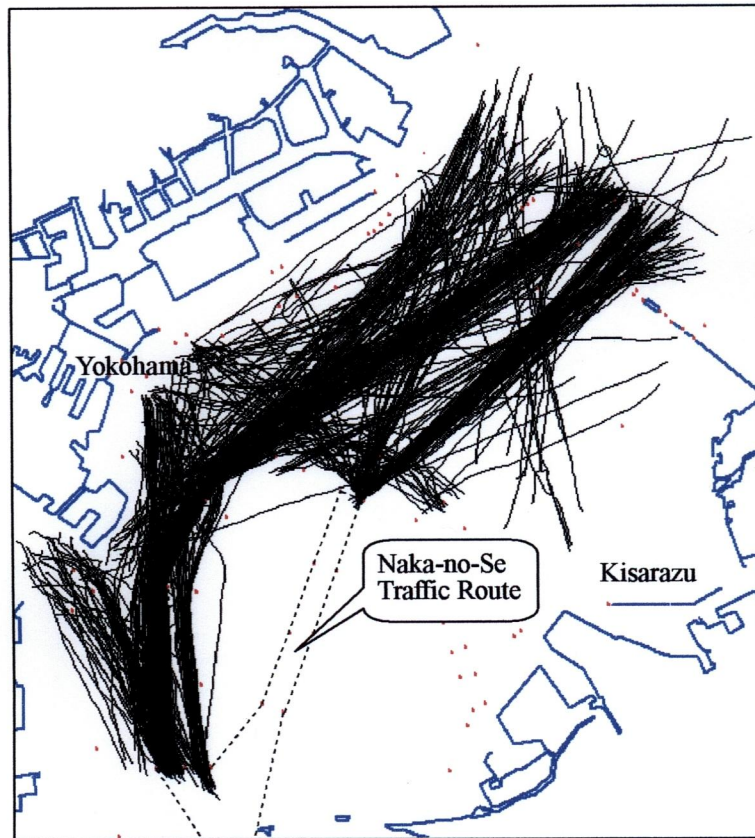


Fig. 5.3.1 Tracks of all ships with length of over 70 m obtained from radar observation (00:00 ~ 23:59, 6th Apr. 2006)

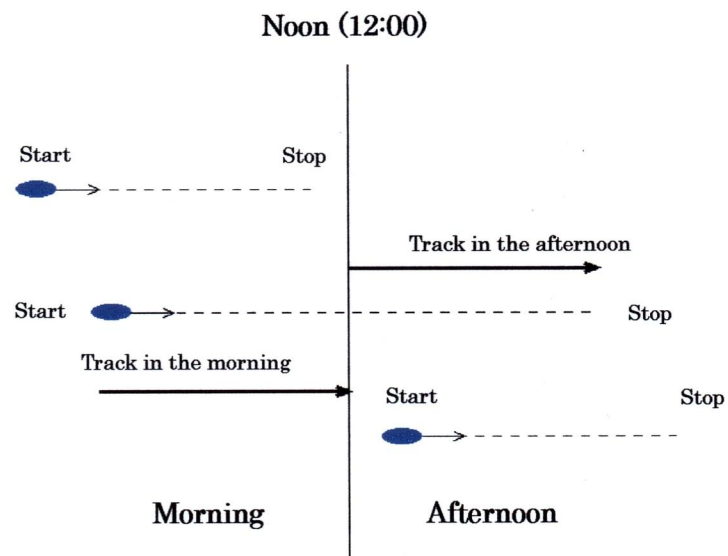


Fig. 5.3.2 The Way of dividing ships' tracks

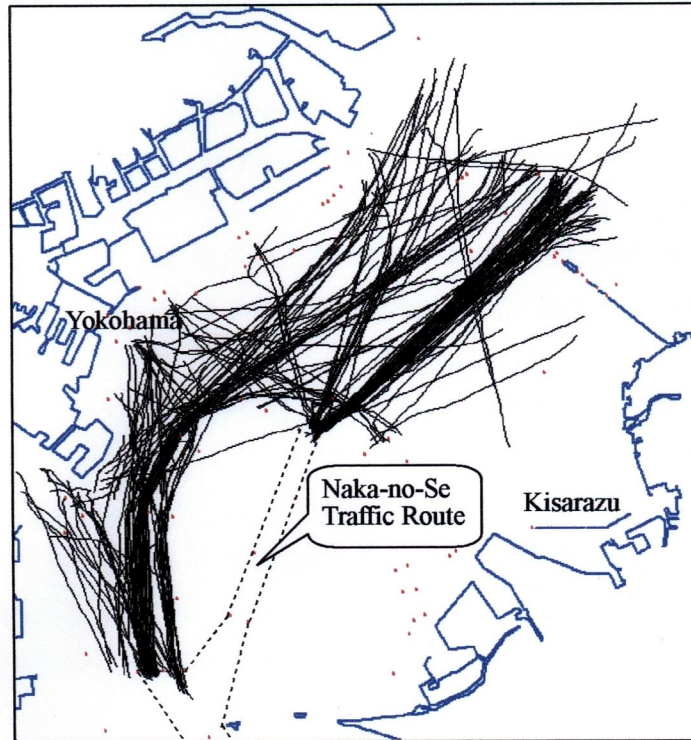


Fig. 5.3.3 Tracks of all ships in the morning (00:00 ~ 12:00)

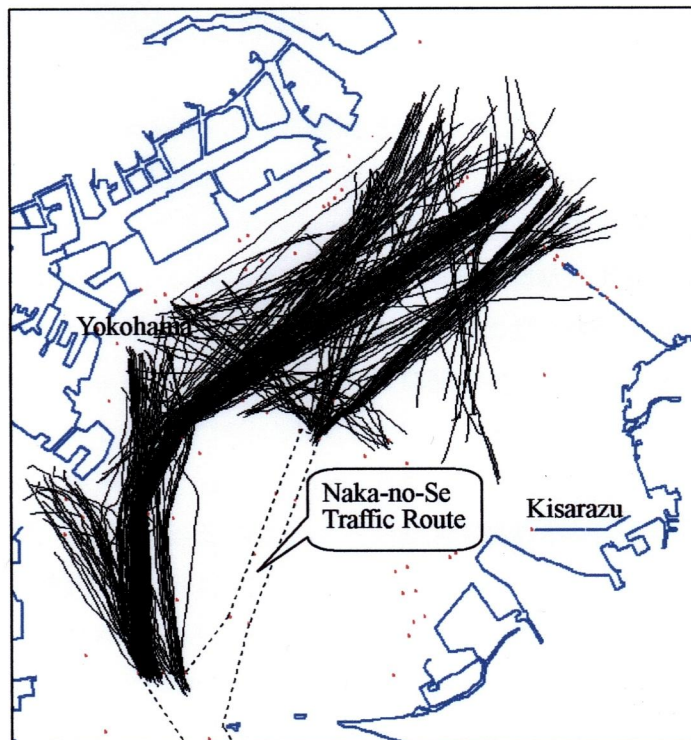


Fig. 5.3.4 Tracks of all ships in the afternoon (12:00 ~ 23:59)

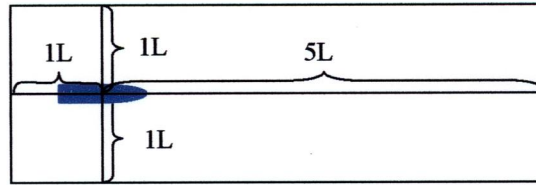


Fig. 5.3.5 Bumper Model used in Tokyo Bay

この海域は、東京湾の入り口付近の海域と比べて狭いので SJ 値の制限値を -1.0 とし、またバンパーサイズとして Fig. 5.3.5 に示すように自船の前方 5L、後方および横方向 1L のものを用いる⁽¹⁸⁾。

この船舶交通データを用いて、交通評価を行い、その結果を次に述べる。

Fig. 5.3.1 に示した船舶航跡データに基づいて式 (5.1.1) を用い、レーダ観測の全期間また午前・午後において危険船舶の密度を計算して図表にする。

まず、SJ 値によって危険と判断された船舶の密度分布を Fig. 5.3.6 に示す。Fig. 5.3.6 から明らかなように、横浜沖では、東京・千葉方面から南航する船舶と横浜沖へ向かう船舶との出会いが多いので、危険船舶の密度が一番高い所で 0.11 ship/km^2 となった。浦賀水道航路南航レーン入り口付近にも高い密度が見られ、その値は 0.1 ship/km^2 であった。これは多くの船舶が集中して浦賀水道航路に入るからである。

また時間別に計算すると、午前中の密度分布を Fig. 5.3.7 に、午後ものを Fig. 5.3.8 に示す。Fig. 5.3.7 が示すように、中ノ瀬航路の出口付近および東京東水路内では危険船舶の密度が高いことが分かった。その理由は、午前中には多くの船舶が中ノ瀬航路を出て東京東水路を通り東京・千葉方面へ向かうのと木更津から出航する船が多いからである。午後は Fig. 5.3.8 から明らかなように、横浜沖では横浜沖へ向かう船舶と南航船との出会い、また浦賀水道航路南航レーン入り口付近では根岸から南航する船舶と他の南航船との出会いが多いため、これらの海域の危険船舶の密度が高くなった。

次に、バンパーモデルによって危険と判断された船舶の密度分布を Fig. 5.3.9 に示す。Fig. 5.3.9 が示すように、危険船舶の密度が最高となった海域は浦賀水道航路南航レーン入り口付近であり、その密度は 0.1 ship/km^2 となった。午前と午後の交通特性を調べるために、時間別の密度を求めた。Fig. 5.3.10 に午前中における危険船舶の密度分布図を示す。Fig. 5.3.10からは、午前中の同じ時間に多くの船舶が中ノ瀬航路出口から並んで航行するので、バンパーが重なりながら東京東水路へ向かう様子が見られた。また、午前中でも横浜沖では浦賀水道航路北航レーンを出て北航し、横浜沖へ向かおうとする船舶が南航船とバンパーが重なることが分かった。午後における危険船舶の密度を Fig. 5.3.11 に示す。Fig. 5.3.11 が示すように、東京湾内の午後における交通特性が明らかに現れ、午前中の交通と違って、南航船が並んで出航する様子が見られた。特に、東京・千葉方面から、横浜港からおよび根岸からの南航船が浦賀水道航路南航レーン入り口付近で同じ時間帯にバンパーを重ね合いながら航路に入ることが動画からでも確認できた。バンパーが重なる状態を一例として Fig. 5.3.12 に示す。

さらに、DCPA・TCPA によって危険と判断された船舶の密度分布を Fig. 5.3.13 に示す。Fig. 5.3.13 が示すように、DCPA・TCPA による危険船舶の最高の密度は 0.06 ship/km^2 であり、SJ 値による危険船舶の最高の密度と比べて半分ぐらいとなった。これは、早い時期から危険と判断する主観的な衝突の危険度である SJ 値と違って、DCPA・TCPA は船舶同士が近くまで接近しなければ危険と判断しないからである。また、Fig. 5.3.9 と Fig. 5.3.13 を比較すると、密度の大きさが違うものの、DCPA・TCPA による危険船舶の分布はバンパーモデルによるものと同じ傾向にあった。その理由は、DCPA・TCPA による判断では自船と他船の平均長さの 3.2 倍以下の DCPA かつ 5 分未満の TCPA を危険な状態とするので、バンパーがこの状態において重なることが多いからである。時間別における危険船舶の密度を Fig. 5.3.14 と Fig. 5.3.15 に示す。Fig. 5.3.14 に午前中の密度分布を、Fig. 5.3.15 に午後の密度分布を示す。Fig. 5.3.14 と Fig. 5.3.15 により、横浜沖では他の海域と違って午前も午後も共に危険船舶の密度が高いことが分かった。また、東京東水路北航レーンでは午前中に、浦賀水道航路南航レーン入り口付近では午後に、船舶が集中的に追い越しを行いながら航路に入るが、平行に追越しても航路が狭いので 2 船間の距離が平均長さの 3.2 以下になることが多い。そのため、東水路北航レーンでは午前、浦賀水道航路南航レーン入り口付近では午後に危険船舶の密度が高くなった。

海域の危険率については式 (5.1.2) により計算し、その結果を Table 5.3.2 にまとめる。Table 5.3.2 に示すように、SJ 値による海域の危険率は、全日では 17.01% であるのに対し、観測された隻数が少ない午前は危険率が小さく 9.04% であった。一方、この日の午後に観測された隻数が午前中に比べて多かったため、SJ 値による午後の危険率は 21.33% となった。

同様に、バンパーモデルおよび DCPA・TCPA による危険率を求めた。その結果、SJ 値による海域の危険率の傾向と同じように、バンパーモデルおよび DCPA・TCPA による危険率は多くの船舶が航行した午後の方が高かった。また、SJ 値が早い時期から危険と判断するのに対してバンパーモデルおよび DCPA・TCPA による危険の判断はさほど早い時期からではないので、両者は SJ 値による危険率よりも小さい値となった。そして、バンパーモデルによって計算される危険率が DCPA・TCPA による危険率より高いのは、Fig. 5.3.16 が示すように自船が平行に他船を追越した後でバンパーが重なったり他船のバンパーの後方で自船のバンパーが重なったりして DCPA・TCPA では危険であると判断しないからである。

この結果により、長さ 70 m 以上の船舶に関しては、午後に数多くのものが危険と感じたと考えられる。

Table 5.3.2 The dangerous rates on the actual route

Time period Type of danger	24 hours	00:00 ~ 12:00	12:00 ~ 23:59
SJ value < -1.0	17.01 %	9.04 %	21.33 %
Bumper overlapping	7.73 %	4.41 %	9.53 %
DCPA・TCPA	5.76 %	3.78 %	6.83 %

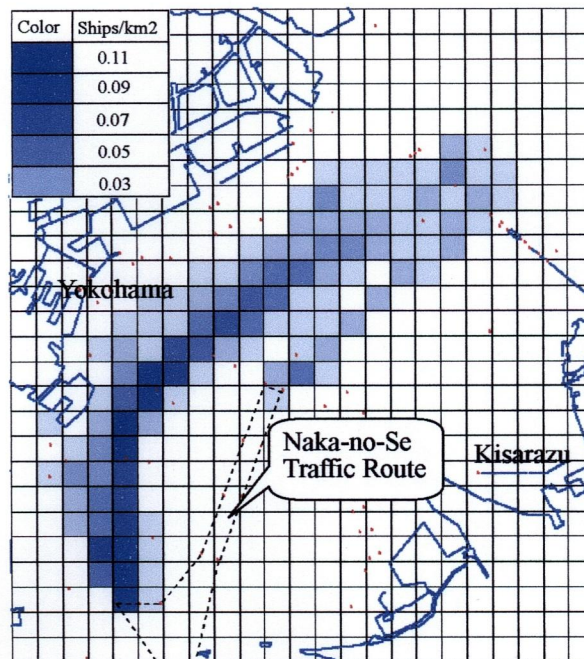


Fig. 5.3.6 Distribution of dangerous ships judged by SJ value in the whole day (00:00 ~ 23:59, 6th Apr. 2006)

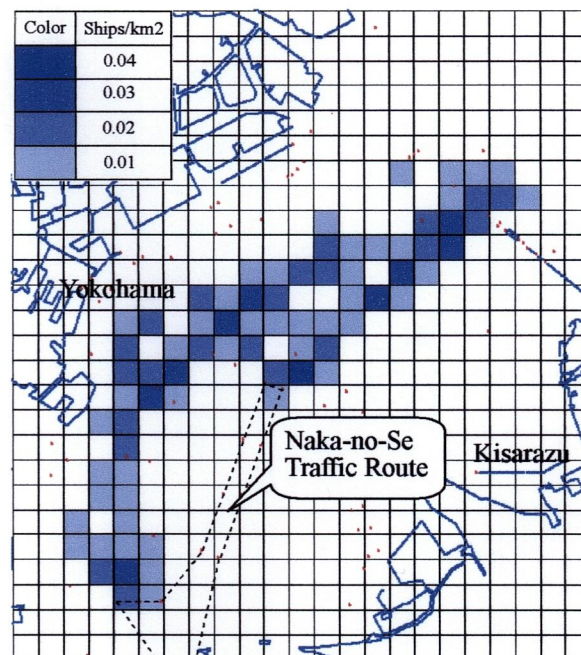


Fig. 5.3.7 Distribution of dangerous ships judged by SJ value in the morning (00:00 ~ 12:00, 6th Apr. 2006)

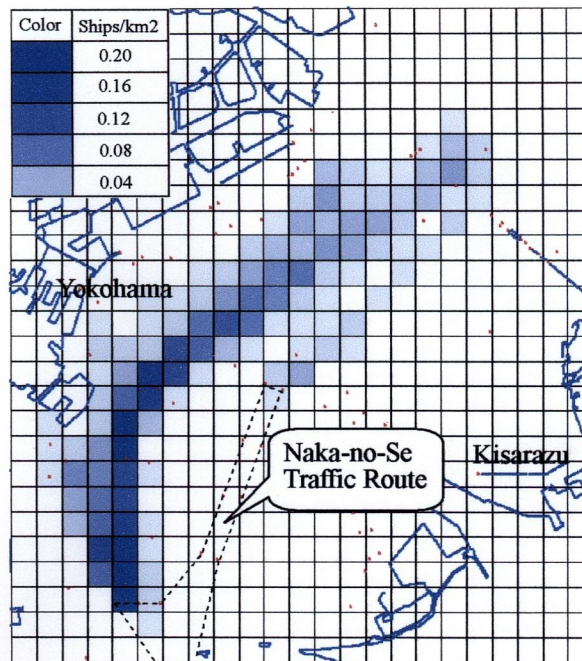


Fig. 5.3.8 Distribution of dangerous ships judged by SJ value in the afternoon (12:00 ~ 23:59, 6th Apr. 2006)

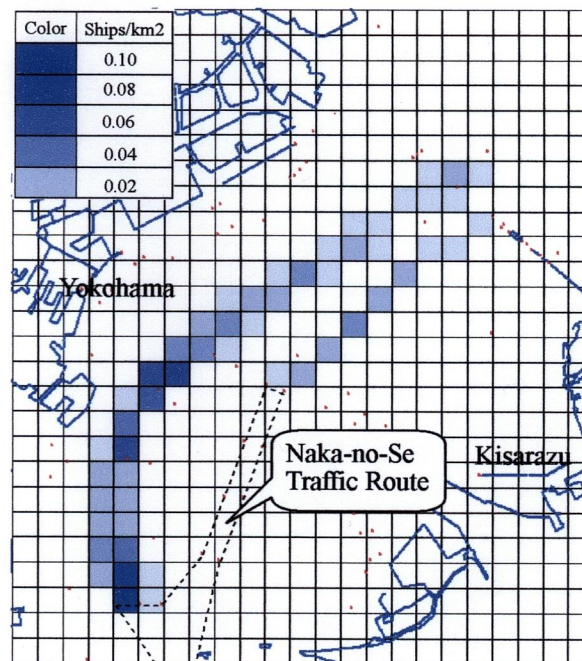


Fig. 5.3.9 Distribution of dangerous ships judged by Bumper Model in the whole day (00:00 ~ 23:59, 6th Apr. 2006)

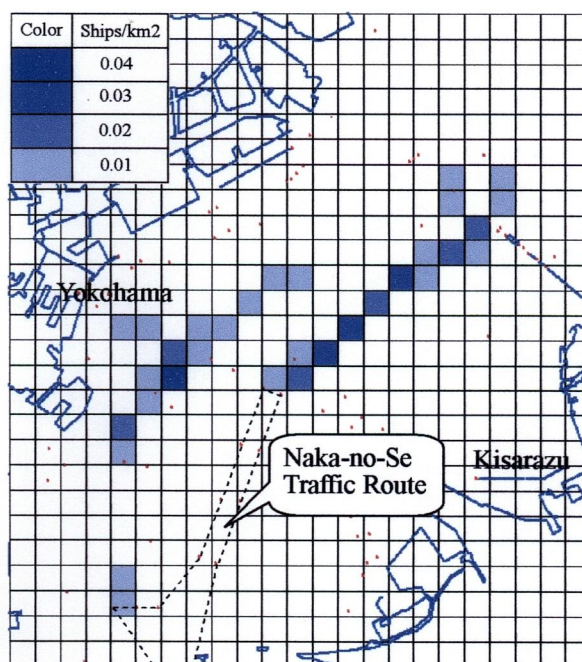


Fig. 5.3.10 Distribution of dangerous ships judged by Bumper Model in the morning (00:00 ~ 12:00, 6th Apr. 2006)

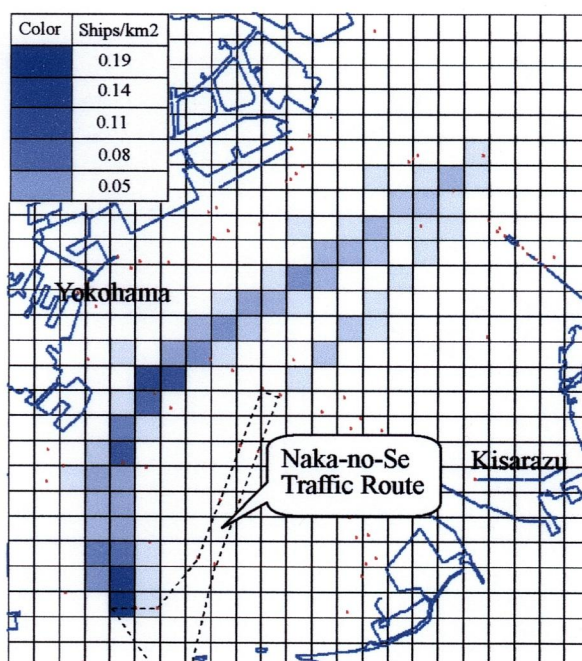


Fig. 5.3.11 Distribution of dangerous ships judged by Bumper Model in the afternoon (12:00 ~ 23:59, 6th Apr. 2006)

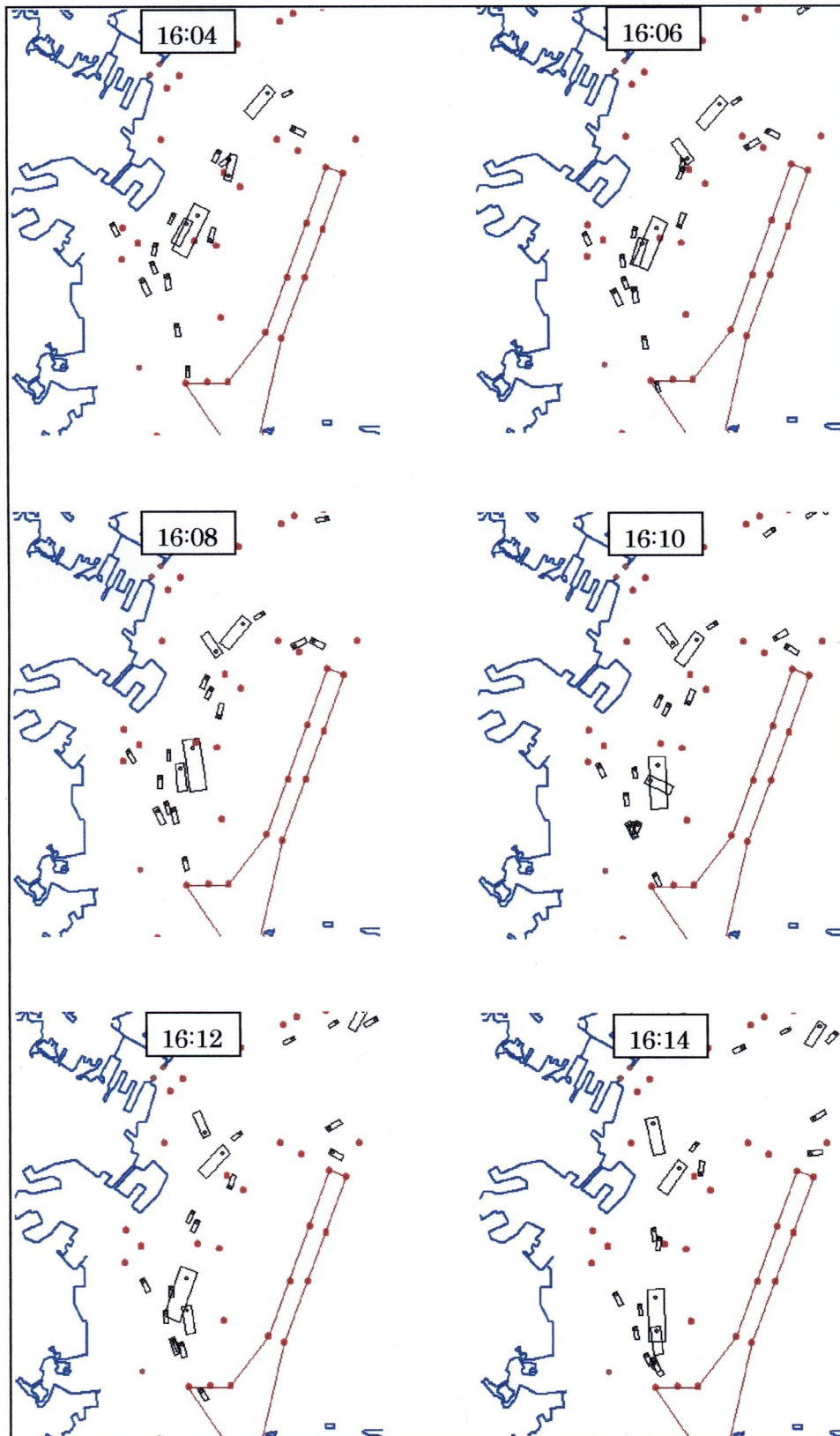


Fig. 5.3.12 Bumper overlapping near the entrance of Uruga Suido
Traffic Route in the afternoon

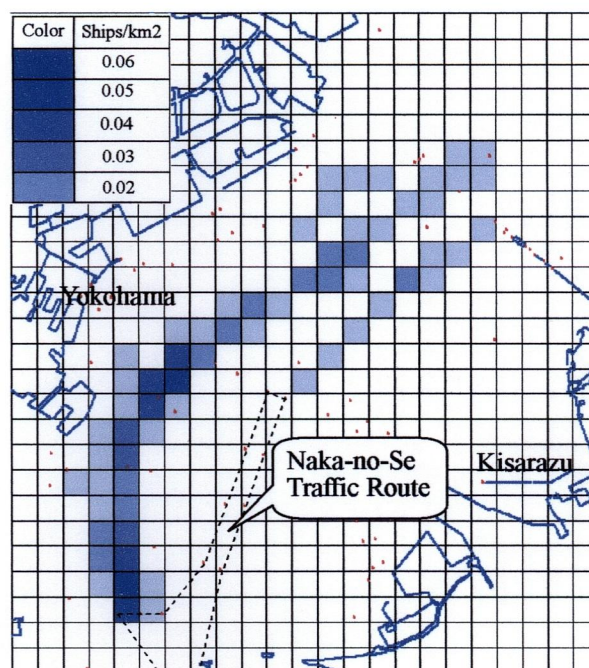


Fig. 5.3.13 Distribution of dangerous ships judged by DCPA • TCPA in the whole day (00:00 ~ 23:59, 6th Apr. 2006)

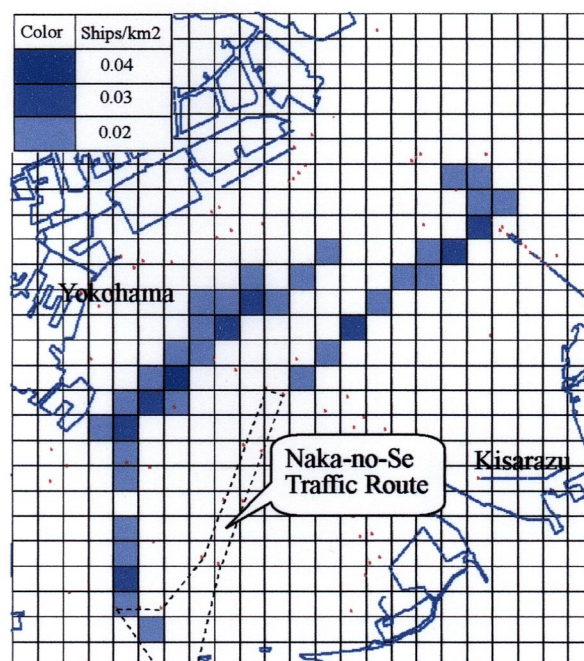


Fig. 5.3.14 Distribution of dangerous ships judged by DCPA • TCPA in the morning (00:00 ~ 12:00, 6th Apr. 2006)

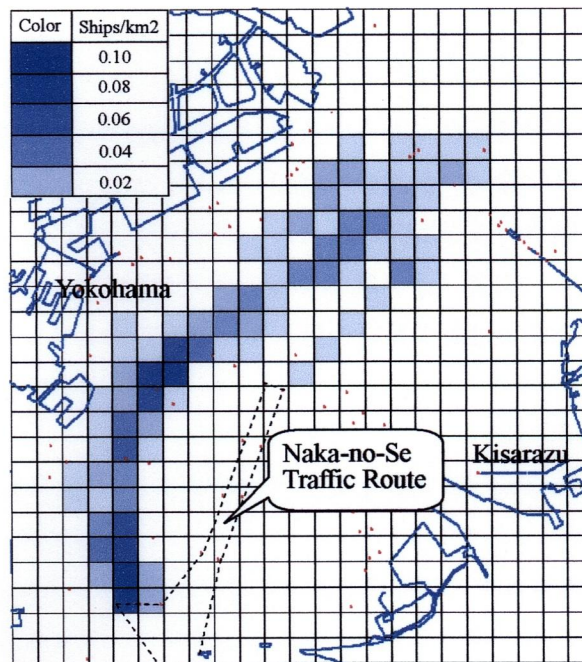


Fig. 5.3.15 Distribution of dangerous ships judged by DCPA • TCPA in the afternoon (12:00 ~ 23:59, 6th Apr. 2006)

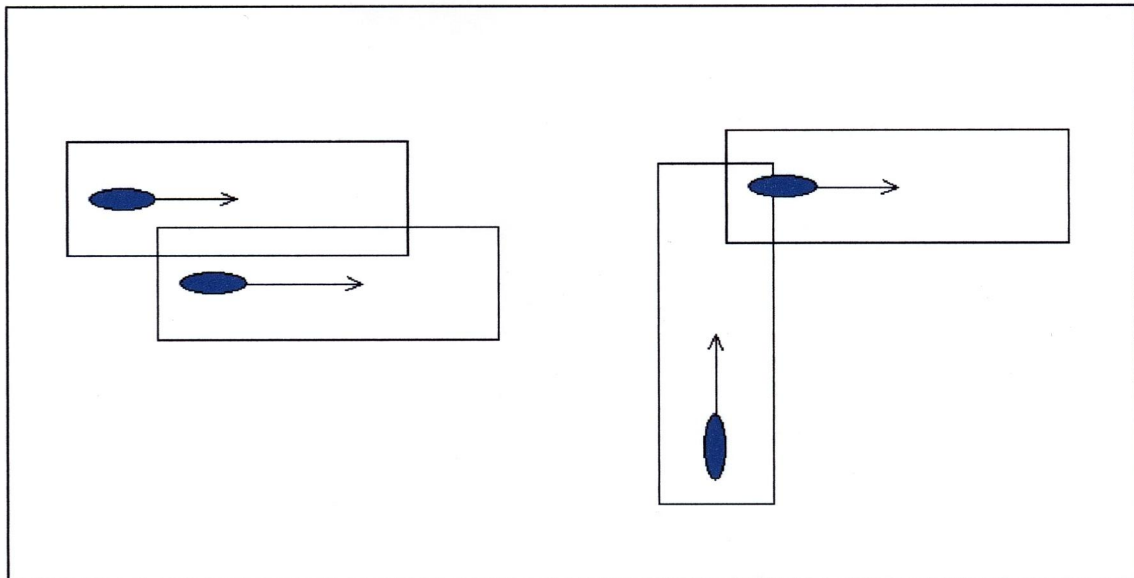


Fig. 5.3.16 The situations judged to be dangerous by Bumper Model are safe by DCPA • TCPA

第6章 ATMS のシミュレーションによる安全性・効率性の評価

第5章では ATMS システムを任意の海域に導入する前に交通評価を行い、各船が今まで通りに航行する場合、その海域のどこでどのように危険な見合い関係が発生していたかを示した。

ここでは、ATMS システムの有効性を検証するために前章に述べた海域にシステムを導入すると仮定し、「先船優先条件」で全船の最適航路を計算する。次に、各船が最適航路を航行する場合において、ATMS システムの導入前と導入後の交通を比較しながら海域全体の安全性および効率性の評価を行う。

6.1 東京湾の入り口付近における AIS データを用いたシミュレーション

6.1.1 シミュレーション設定

ATMS システムの評価の第一段階として第5章5.2節にシステムを導入する前の交通評価を行ったが、ここでシステム評価の第二段階として Fig. 5.2.2 に示した AIS データを用いてシミュレーションを行い、ATMS システムの有効性を検証する。

まず、シミュレーションを行うために Fig. 6.1.1 に示す海域を ATMS システムを運用する海域とする。北側は日本船長協会の自主設定の分離通航帯の南端を境界とする。「先船優先条件」では、後で ATMS システムに参加する船舶が先に参入する船舶の航路を考慮して自船の最適航路を計算する。この海域は比較的広く船舶が自由に航行できるので、全船の最適航路を求めるためのグリッドを自由なものをを用いる。すなわち、現在位置 P_D と目的地 P_A を結ぶ直線を10等分し、各等分点を通る直線上にその海域をカバーできるグリッドを100 m の間隔で設定する。

次に、DP で計算を速くするためには Fig. 6.1.2 に示すように予め海岸への計算を中止するようにした。実際に東京湾へ向かう船舶は、この海域の南端で早い速度で航行し分離通航帯へ近づくとつれて徐々に減速する傾向がある。そのため、実際の初速をシミュレーションに使用するのが不適切となるので、AIS 動的情報に含まれる各船の速力より平均値を計算しそれぞれの船の速力としてシミュレーションを行った。

また、この海域では、朝方に入湾船が集中するため、自船と他船の針路差が小さい場合に SJ 値による衝突危険判定を行うと、危険なケースが多すぎて航行できなくなってしまうことがある。そこで、SJ 値による判定は針路差が 40° 以上の場合にのみ行うこととした。

以上の設定に基づき ATMS システムに参加する順番で（この海域に進入する順番）次々と各船の最適航路を計算する。以下にシミュレーション結果を述べ、システム導入後の交通の安全性と効率性がどの程度改善されるかを検証する。

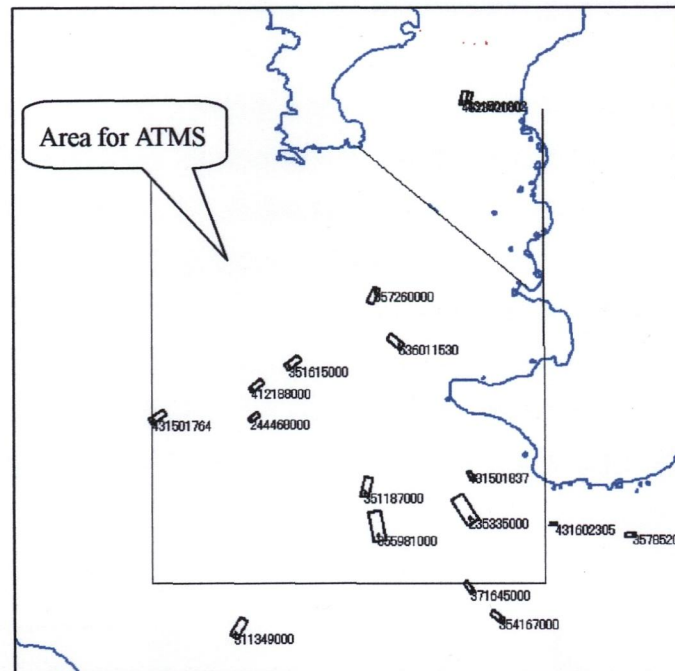


Fig. 6.1.1 Area for traffic management by ATMS

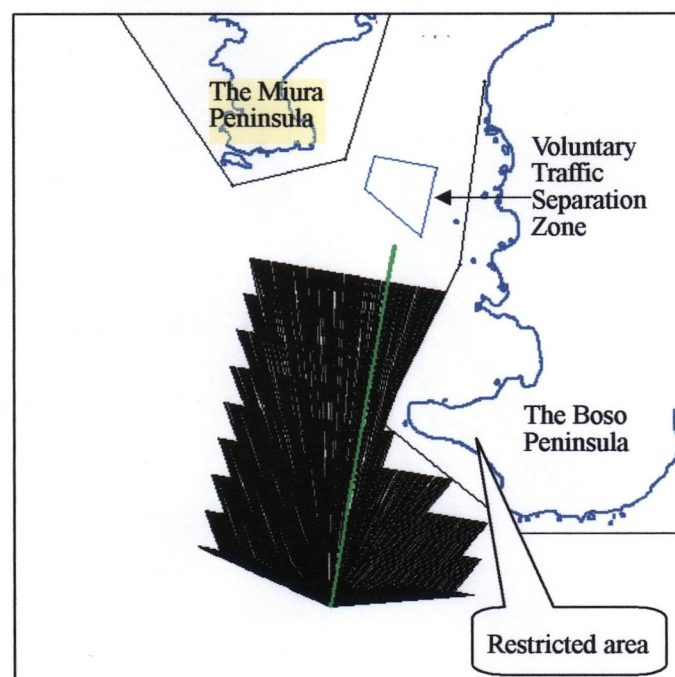


Fig. 6.1.2 Restricted area of calculating the optimal route

6.1.2 シミュレーション結果および解析

まず、Fig. 4.3.1 に示したアルゴリズムのように全船の速力を一定にして衝突の恐れが発生するところでは減速せずに計算を中止する方法で最適航路を求め、その結果を Fig. 6.1.3 に示す。

Fig. 6.1.3 が示しているように、減速を考慮しないため、システムに後で参加する船は、他船が自主設定の分離通航帯に入ってから遠回りして航路に入ることとなった。しかし、この遠回りした船舶の航路形状からみると、最適航路とは言えない。そのため、これらの最適航路を航行する場合においては海域の交通評価を行わないことにした。

そこで、Fig. 4.3.3 に示したアルゴリズムのように他船と危険な遭遇に陥ったときに避航すべき船舶が減速するという条件を取り入れ、シミュレーションを行った。シミュレーションでは避航すべき船舶が増速せずに減速するようにするのは、実際に航行中の船も危険な遭遇を避けるときに一般的に減速するからである。シミュレーション結果は次の通りである。

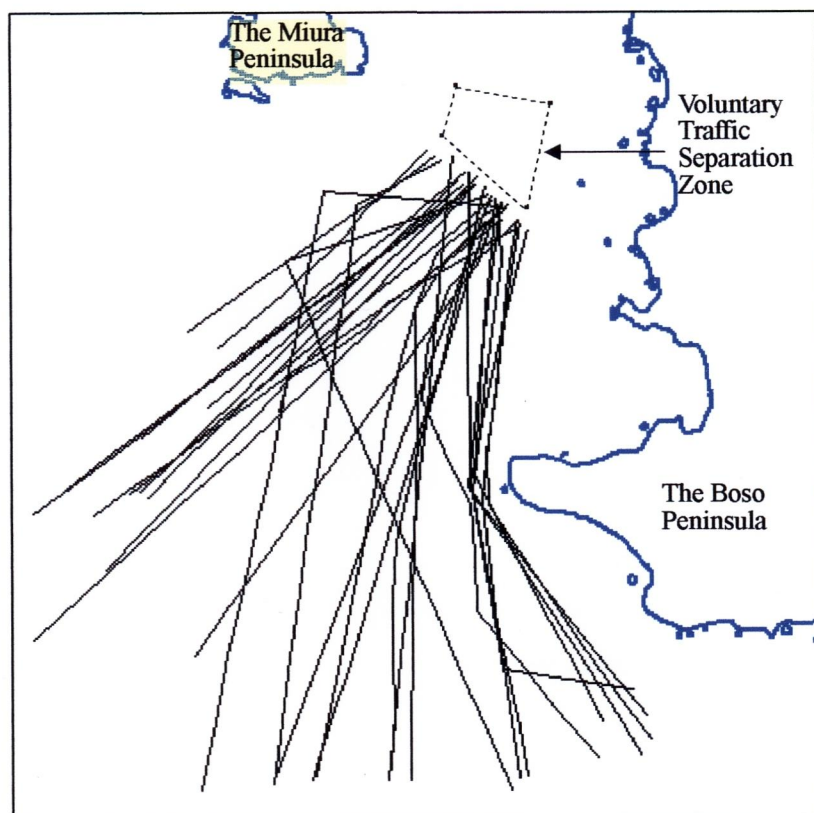


Fig. 6.1.3 The optimal routes of all ships equipped with ATMS in case of constant speed (SJ value of all ships > -0.5)

全船において航行中もし他船と衝突の危険が発生したら自船の速力を 0.5 knot ずつ落とし再計算を行った。シミュレーション結果を Fig. 6.1.4 に示す。シミュレーション結果により、3 隻が途中で減速し危険な遭遇を避けて次のステージから再び元の速力へ戻したと分かった。

減速した船は Table 6.1.1 に示す。減速した船の中に最も減速した船舶の最適航路を Fig. 6.1.5 に示す。この船は、Fig. 6.1.5 において矢印で示すステージでは、船速を 16.68 knots から 8.71 knots まで落とし、北航船群の間に割り込んで航行した。Fig. 6.1.5 から分かるように、最適航路には最後のステージまでまっすぐに航行する航路があった。しかし、そこから目的地までは直行できなくなったので、最適航路は Fig. 6.1.5 に示したものとなった。

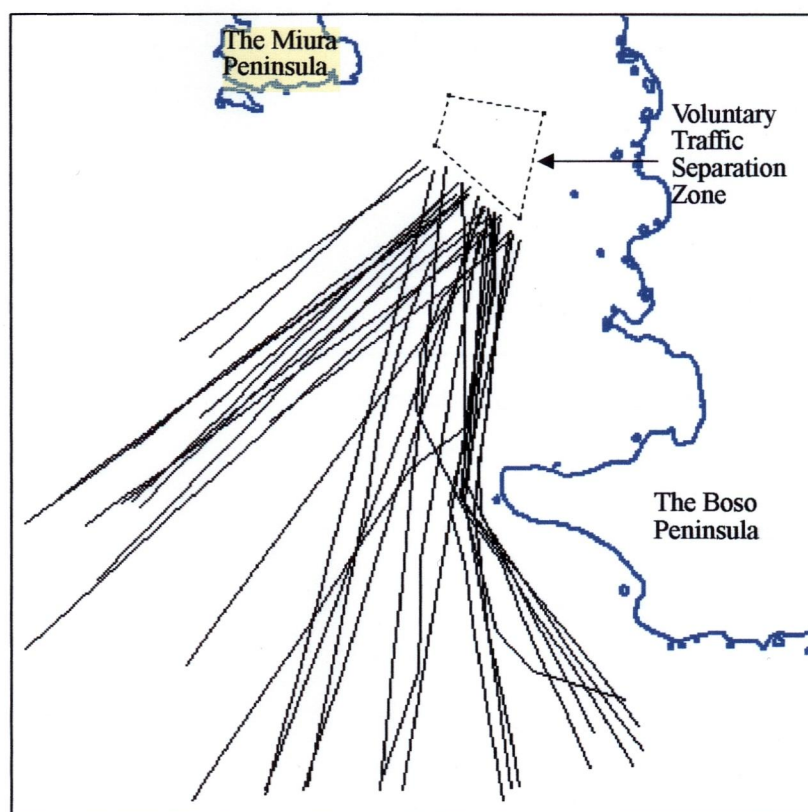


Fig. 6.1.4 The optimal routes of all ships equipped with ATMS in case of reducing speed (SJ value of all ships > -0.5)

Table 6.1.1 Ships reducing speed on the optimal routes

Ship number	Original speed [knot]	Reduced speed [knot]
8	14.62	12.15
15	12.10	11.63
16	16.68	8.71

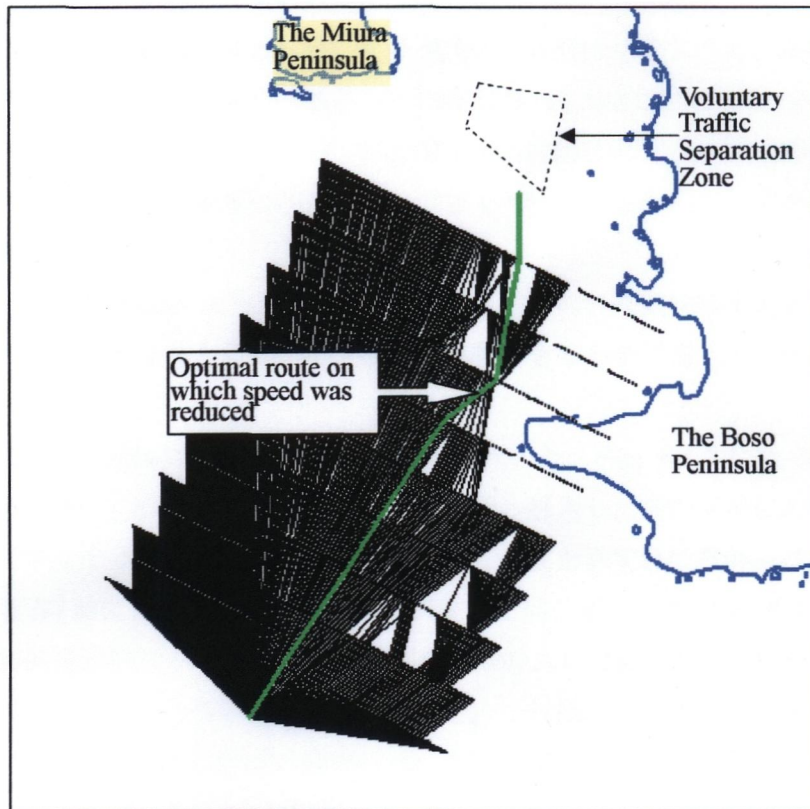


Fig. 6.1.5 The optimal route of ship reduced its speed
(SJ value of all ships > -0.5)

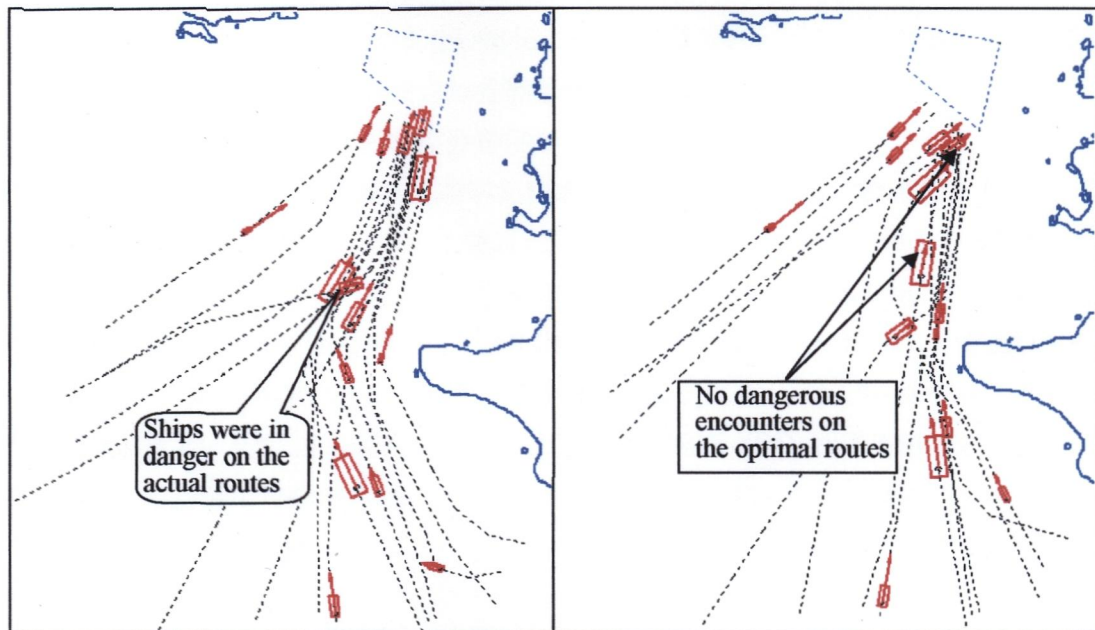


Fig. 6.1.6 Ships that were in danger on the actual routes have no dangerous encounter on the optimal routes (03:40, Apr. 27th, 2006)

また、実航路において自船が他船と危険な遭遇に陥ったが、最適航路の上で他船と危険な遭遇にならなかった例を Fig. 6.1.6 に示す。Fig. 6.1.6 の左図に示すように、実航路において瀬戸内海方面からの船は右転して北航するところで左舷後方に他船とバンパーを重ね、さらに右舷に別の船と危険な遭遇となった。一方、Fig. 6.1.6 の右図に示すように、同じ時刻ではその船が最適航路を航行すれば目的地の近くまでに到達していた。もちろん、最適航路上には他船との危険な遭遇がなかった。

この海域において、各船が ATMS システムを持って自船の最適航路を計算し、その航路を航行した場合、交通の安全性と効率性がどの程度改善できるかを考察した。その結果を以下に説明する。

まず、式 (5.1.1) を用いて危険船舶の密度分布を求めた。Fig. 6.1.7 には SJ 値による危険船舶の密度分布を示す。ATMS システムを導入する前と導入した後の海域における危険船舶の密度を分かりやすくするために、Fig. 6.1.7 において密度を表す色の濃淡度は実航路を航行した場合における SJ 値による危険船舶の密度を表すのと同じ値にした。Fig. 6.1.7 が示しているように、日本船長協会の自主設定の分離通航帯の南端の入口付近では、各船が最適航路を航行しても SJ 値によって危険と判断された場合がある。これは、上に説明したように最適航路計算では SJ 値による衝突危険判定は針路差が 40° 以上の場合にのみ行っていたが、交通の安全性を評価する場合では針路差 10° 以上の場合について行っていたためである。しかし、Fig. 6.1.7 から明らかなように ATMS システムを導入する前と比べ、全船が最適航路を航行することにより SJ 値による危険船舶の密度は下がり、最高の密度が 0.013 ship/km^2 だけとなった。また、最適航路計算では、他船とのバンパーが重ならない拘束条件を取り入れたため、バンパーが重なることがなかった。なお、最適航路計算では針路差が 40° 以下の場合にのみ DCPA・TCPA を計算したが、ここではすべての見合い関係について DCPA・TCPA を計算してその結果、DCPA・TCPA によって危険と判断される船舶がなかった。そのため、バンパーモデルおよび DCPA・TCPA による危険船舶の密度分布図はない。

次に、式 (5.1.2) を用いて海域の危険率を計算し、Table 6.1.2 にその結果をまとめた。Table 6.1.2 に示すように、ATMS システムを導入したことにより、海域全体において SJ 値による危険率を 3.23% 減らすことができた。（ここでは針路差 10° 以上の場合について SJ 値による衝突危険判定を行っていたため、最適航路の上での危険率が 14.97% となっている。）最適航路計算では、他船とのバンパーが重ならない拘束条件を取り入れたため、バンパーモデルによって判断される危険率は 0% となった。DCPA・TCPA によって危険と判断される遭遇もなかったため、この指標による海域の危険率は 0% となった。つまり、最適航路を航行することによって、SJ 値による危険率を 3.23%、バンパーモデルによる危険率を 4.11%、および DCPA・TCPA による危険率を 0.67% 改善することができた。

さらに、効率性を評価するために、航海時間と航海距離について考察を行った。実際の航海時間と最適航路の航海時間との関係を Fig. 6.1.8 に示す。Fig. 6.1.8 において、横軸が実際の航海時間を縦軸が最適航路の航海時間を表している。 45° の線の下にあるものは、実際の航海

時間の方が長いことを意味する。実際の航海時間と最適航路の航海時間を式 (5.1.3) に代入した結果、全航路の航海時間を 3.88% 短縮できたことが分かった。また、実際の航路と最適航路の総航海距離を計算し、その結果を Fig. 6.1.9 に示す。Fig. 6.1.9 に示すように、全船が最適航路を航行すれば、この海域における航海距離を 12.74 miles 減少することができた。これは、多くの船が最適航路の上を直線で目的地まで航行できたことによる。

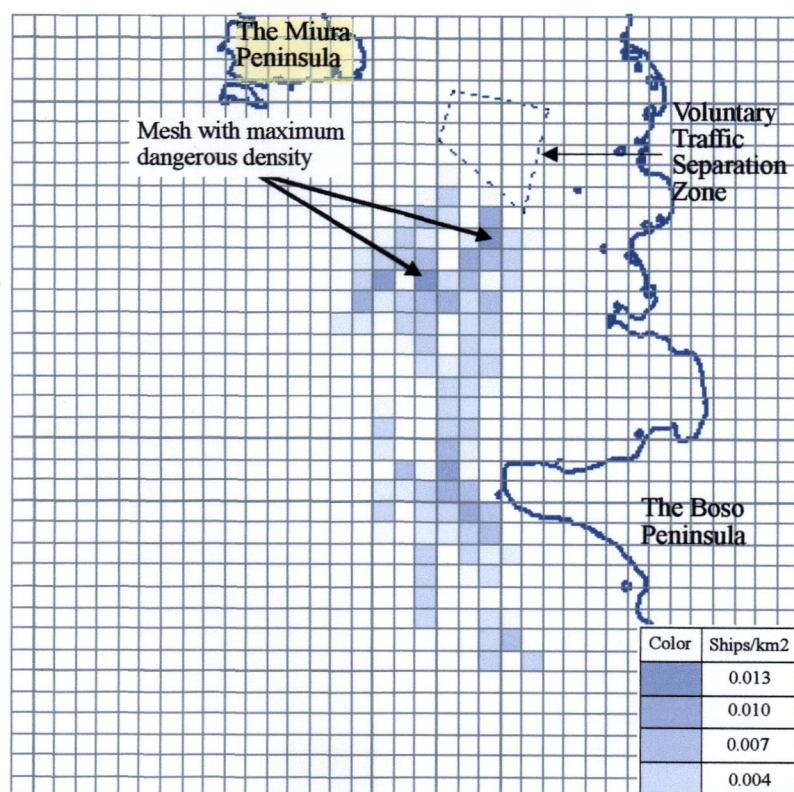


Fig. 6.1.7 Density of dangerous ships judged by SJ value

Table 6.1.2 The dangerous rates on the actual and optimal route

Type of danger	Dangerous rate on the actual route	Dangerous rate on the optimal route	Improved rate
SJ value < -0.5	18.20%	14.97%	3.23%
Bumper overlapping	4.11%	0%	4.11%
DCPA · TCPA	0.67%	0%	0.67%

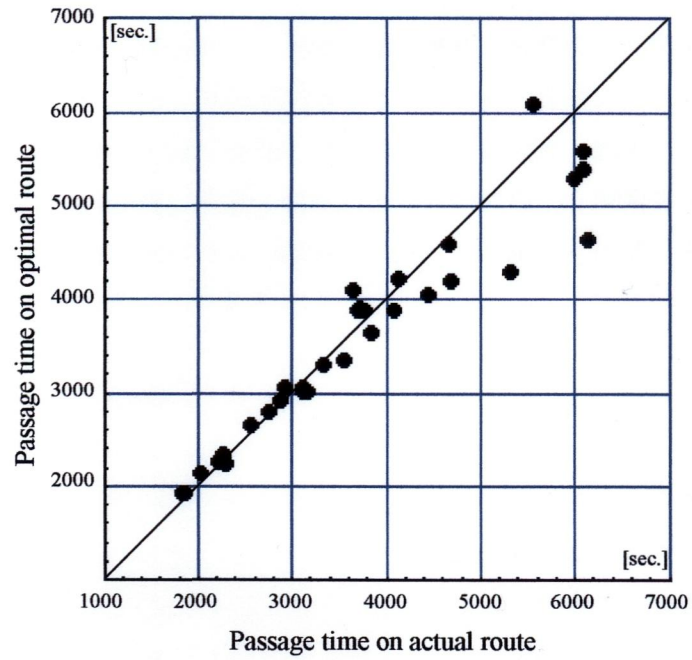


Fig. 6.1.8 Passage time on the actual and optimal route

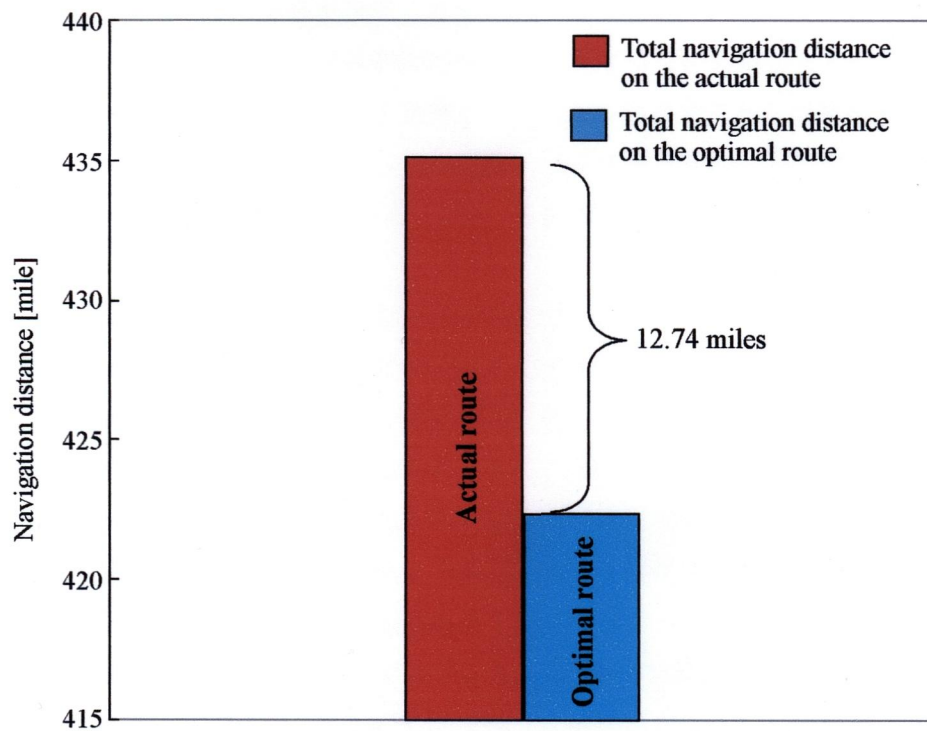


Fig. 6.1.9 Navigation distance on the actual and optimal route

6.2 東京湾内におけるレーダ観測データを用いたシミュレーション

東京湾の海上交通環境上の特性としては、まず、輻輳しているだけではなく、他の輻輳海域と比較して巨大船などの大型船が多いことである。また、大型船の可航水域が限られているため、輻輳した帯状の流れとなり、それが至るところで分流、合流、交差している。さらに、外国船の占める比率が他の輻輳海域と比較して高い⁽¹⁾。そのため、船舶が東京湾を入出湾する時は常に細心の注意を必要とする。現在、航行安全のために様々な対策を実施されているが、以下にこのような厳しい交通環境の中で ATMS システムを導入すれば、海域の交通環境が改善できるかどうかを検討する。

6.2.1 シミュレーション設定

まず、ATMS のシミュレーションを行うため、Fig. 6.2.1 に示す海域を ATMS 導入エリアとする。この海域では、先にシステムに参加する船舶が後でシステムに参入する船舶に対し優先権を有することになる。Fig. 6.2.1 に示すように、船舶が「風の塔」、アクアライン、中ノ瀬などに入らないように予め制限海域を設定した。また、夕方の時間帯に浦賀水道航路南航レーン入り口付近では、多くの南航船が同時に航路に入るため、Fig. 6.2.1 に示すエリアではバンパーの前方長を 2.5 L に短縮し他船のバンパーと重ならなければ船を航行させて南航レーン入り口付近で渋滞が発生するのを防いだ。これは、シミュレーション結果によりこの条件を設定しなければ、航路の入り口付近で安全のため各船が大いに減速せざるを得ないので、後で入航する船が航行できなくなる現象が発生したからである。なお、最適航路の計算過程において、出発地点で既に自船のバンパーが他船のバンパーと重なっている場合もあるので、出発時、バンパー、SJ 値および DCPA・TCPA を計算して、どれかが安全であれば航行させることにした。

次に、レーダ観測データにより各船の出発・到着位置を求め、平均速力を計算してそれぞれの船舶の速力とした。船の長さについては、第 5 章 5.3 節で交通評価を行った船の長さと同じものとする。

さらに、東京湾内において、船舶が自由に航行できるエリアが限られるので、DP により最適航路を計算するためのグリッドを予めいくつかを設定する。南航船に関しては、東京・千葉方面からの船舶のためのグリッドを Fig. 6.2.2 に、木更津からのグリッドを Fig. 6.2.3 に、横浜沖からのグリッドを Fig. 6.2.4 に示す。また、北航船に関しては、中ノ瀬航路を出て北航する船舶のためのグリッドを Fig. 6.2.5 に、浦賀水道航路北航レーンを出て横浜へ向かうためのグリッドを Fig. 6.2.6 に示す。グリッドが置かれているラインは、交通流に対しほぼ直角に配置され、ライン上における間隔は 100 m とした。各グリッドにおいて、自船が他船を避航する必要のない場合の最適航路をそれぞれ Fig. 6.2.7、Fig. 6.2.8、Fig. 6.2.9、Fig. 6.2.10、Fig. 6.2.11 に示す。これらの図により、自船が他船を避ける必要がないので最適航路は最短距離航路となった。これらの主要なルート以外を航行する船については、固定グリッドではなく自由グリッドを用いて最適航路を計算する。

以上の条件で全船について最適航路を計算し、その結果を次に述べる。

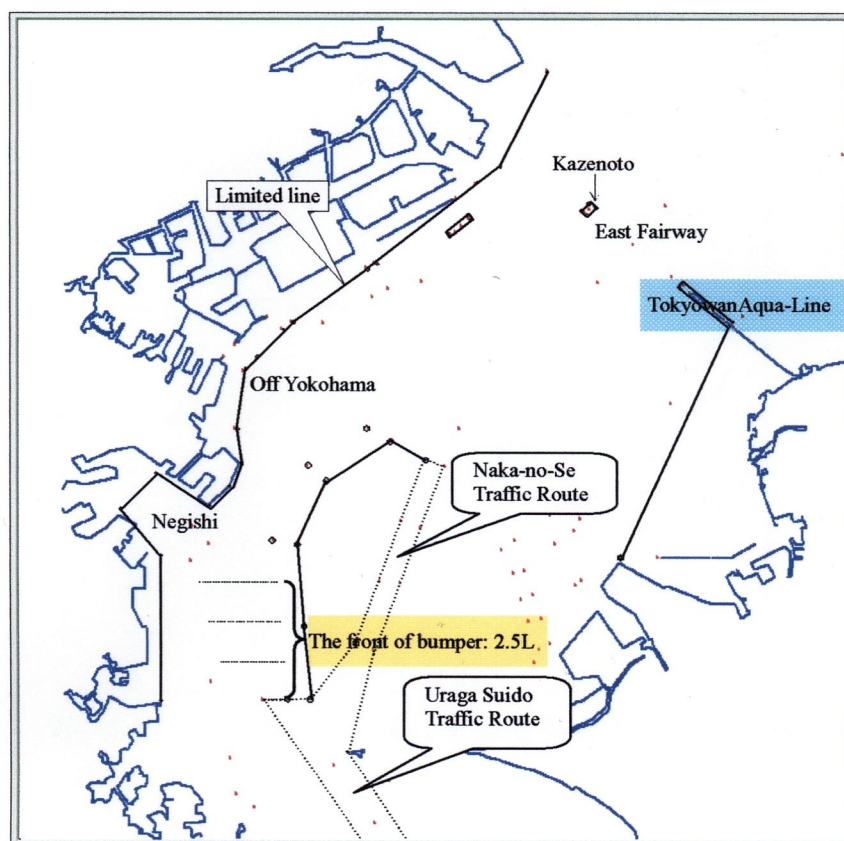


Fig. 6.2.1 The area in which all ships are equipped with ATMS

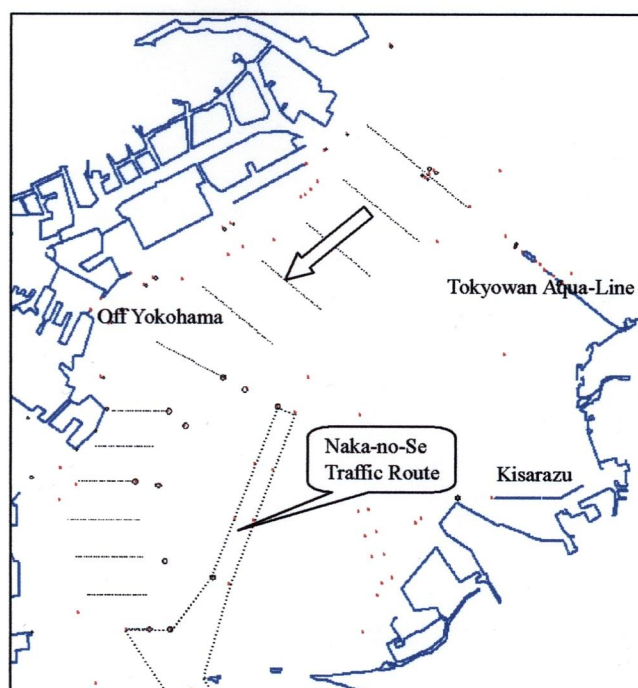


Fig. 6.2.2 Grids for southbound ship from Tokyo and Chiba direction

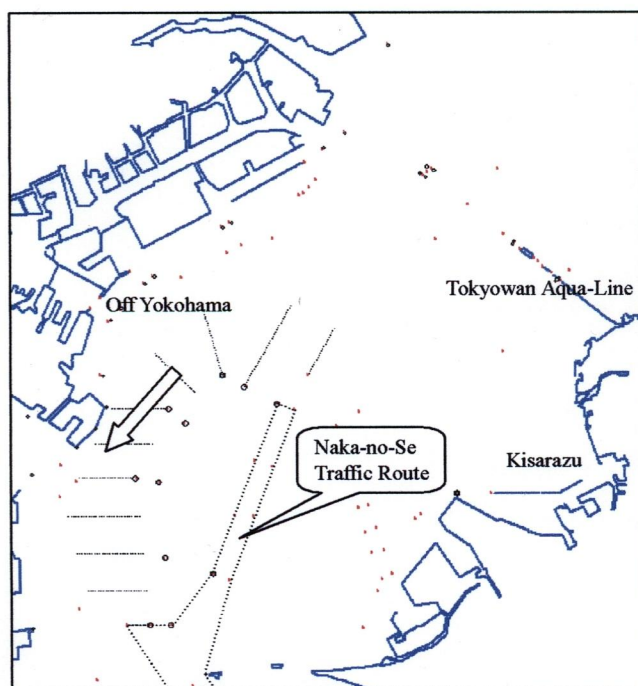


Fig. 6.2.3 Grids for southbound ship from Kisarazu direction

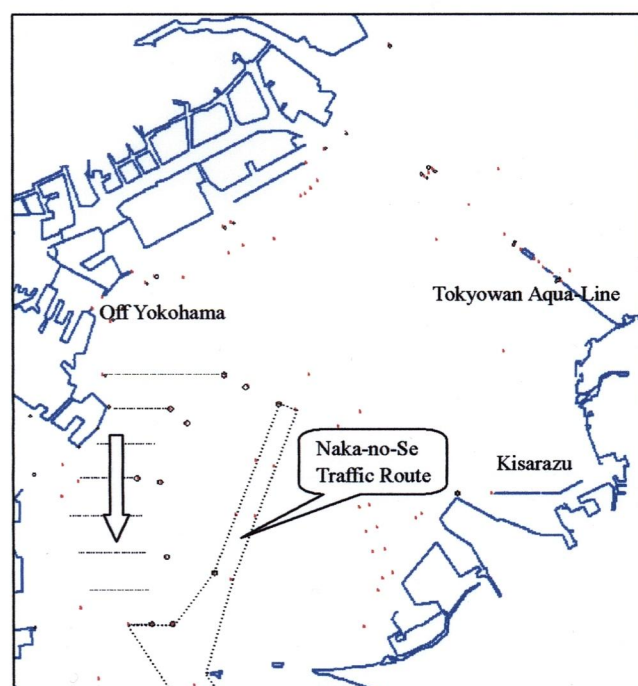


Fig. 6.2.4 Grids for southbound ship from Yokohama direction

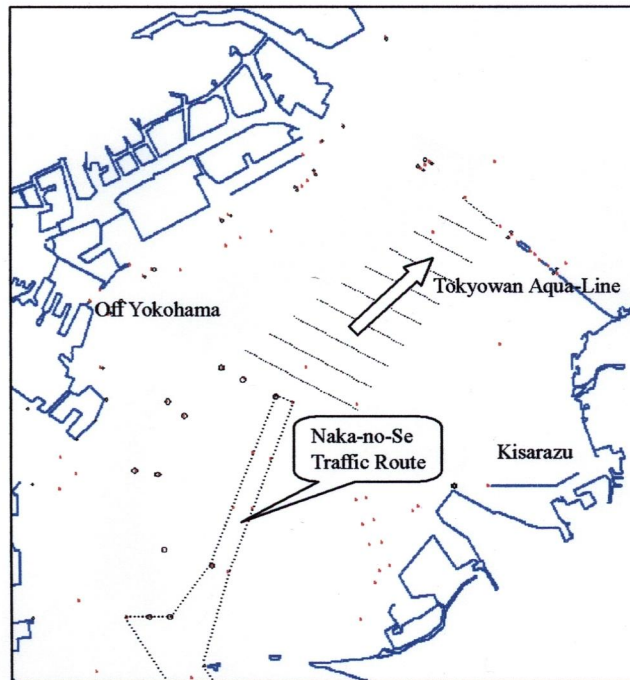


Fig. 6.2.5 Grids for northbound ship to Tokyo and Chiba direction

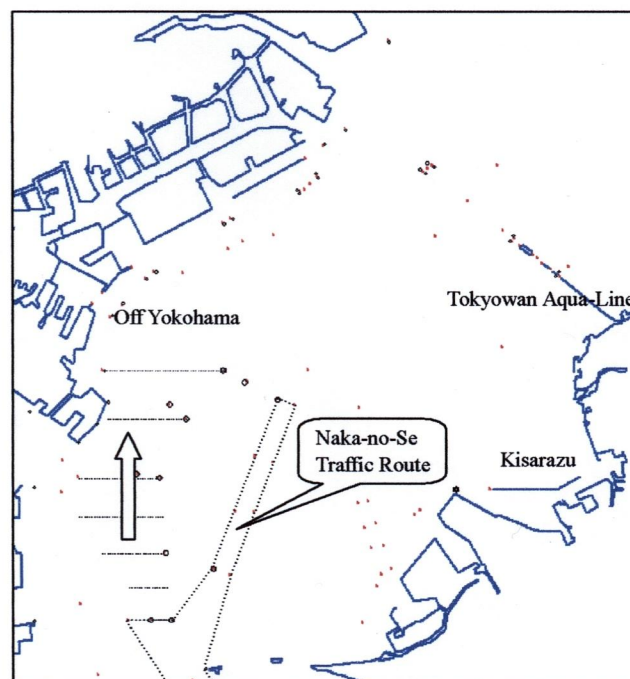


Fig. 6.2.6 Grids for northbound ship from Uraga
Suido Traffic Route to Off Yokohama

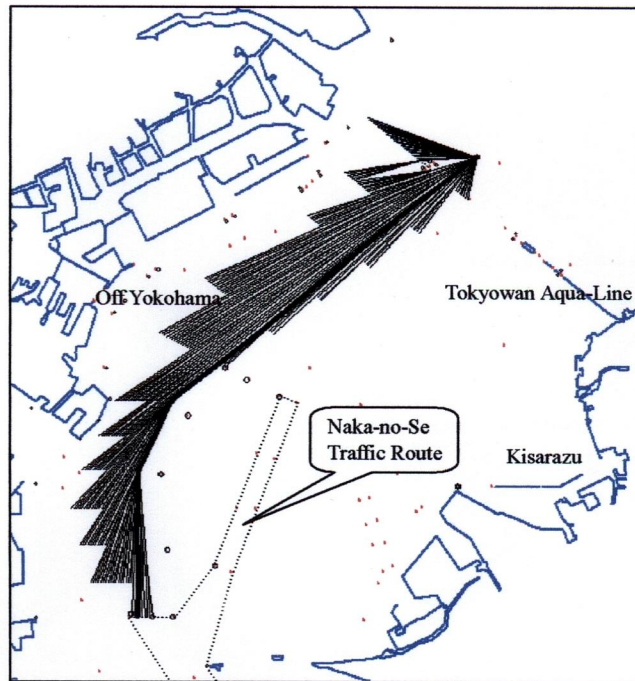


Fig. 6.2.7 The optimal route in case that own ship joins in ATMS firstly from Tokyo/Chiba direction to Uraga Suido Traffic Route

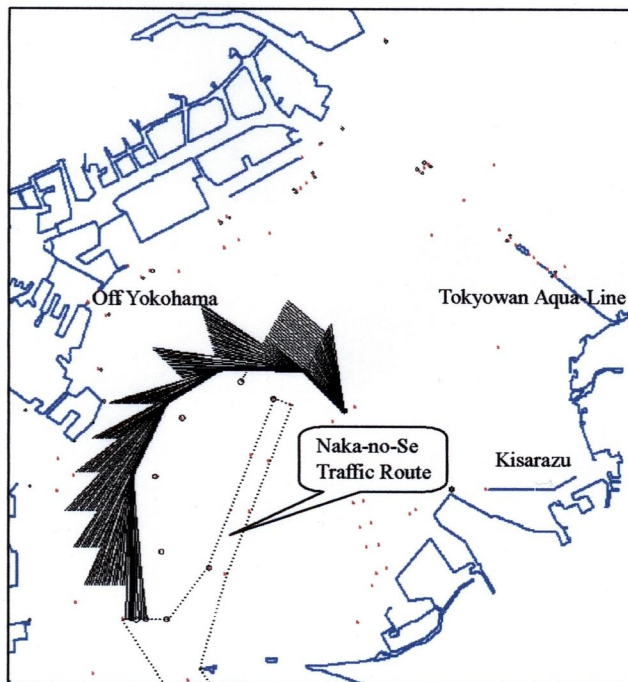


Fig. 6.2.8 The optimal route in case that own ship joins in ATMS firstly from Kisarazu direction to Uraga Suido Traffic Route

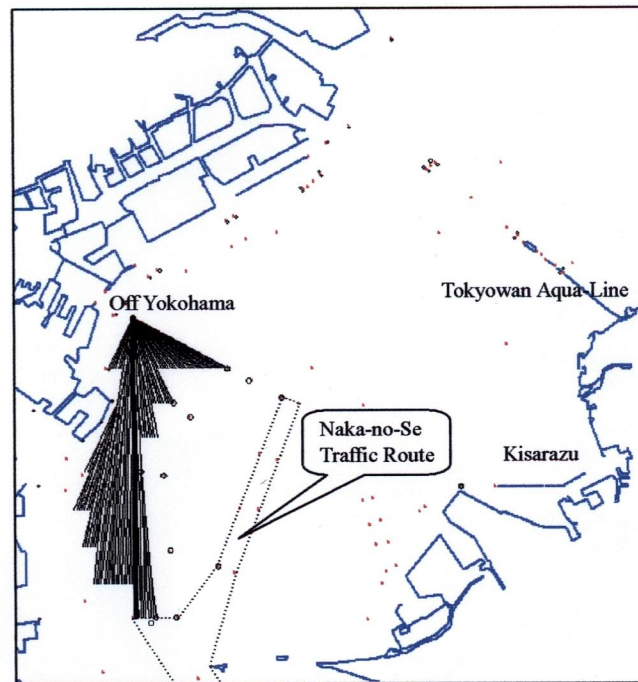


Fig. 6.2.9 The optimal route in case that own ship joins in ATMS firstly from Off Yokohama to Uruga Suido Traffic Route

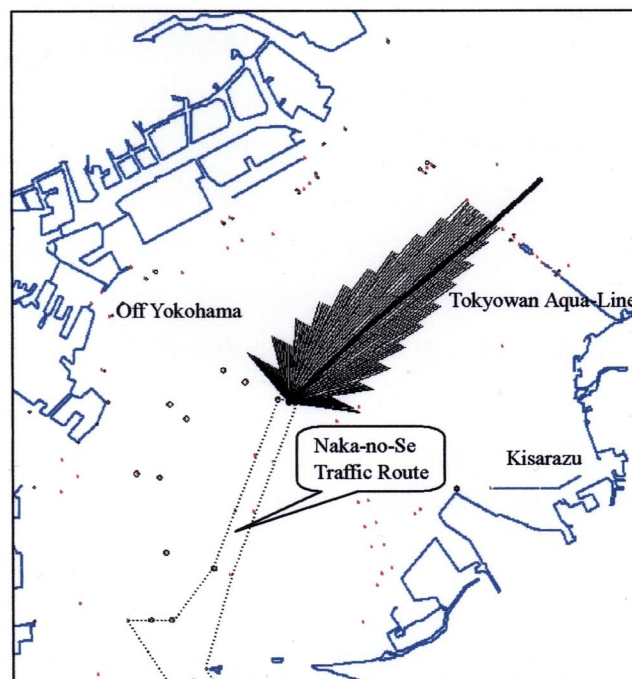


Fig. 6.2.10 The optimal route in case that own ship joins in ATMS firstly from Naka-no-Se Traffic Route to Tokyo/Chiba direction

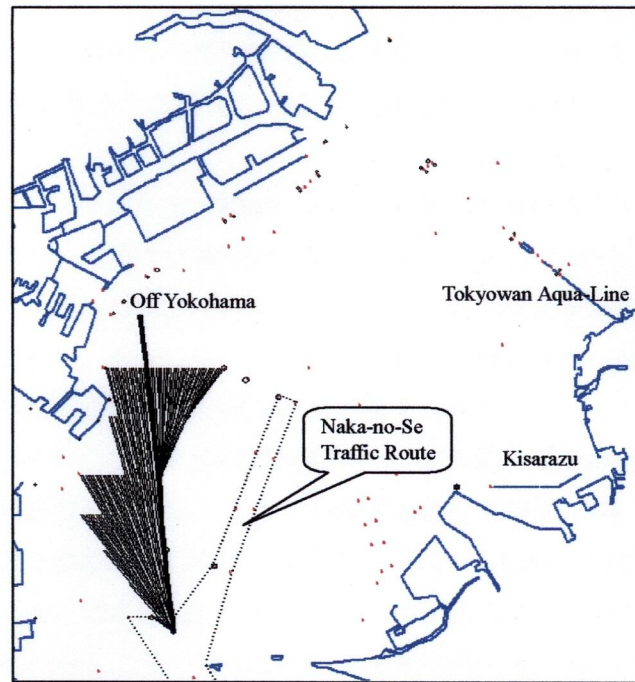


Fig. 6.2.11 The optimal route in case that own ship joins in ATMS from Uruga Suido Traffic Route to Off Yokohama

6.2.2 シミュレーション結果および解析

ATMS システムに参加する船舶は順次に最適航路を計算し、それを予定航路として航行しながらその航路情報を他船に送る。後でシステムに入ってくる船舶は他船の航路情報と AIS の航海情報を用いて自船の最適航路を計算する。このようにして計算された全船の最適航路を Fig. 6.2.12 に示す。また、最適航路を午前と午後に分けて示すと、Fig. 6.2.13 と Fig. 6.2.14 となる。Fig. 6.2.13 に示すように、午前中は中ノ瀬航路を出て東京東水路へ向かう船舶が多いと分かった。また、Fig. 6.2.14 により午後に多くの船舶が東京・千葉、横浜、根岸方面から浦賀水道航路へ入航することは明らかである。

最適航路において、動画で船舶航行を確認したところ減速したり遠回りしたりする船舶があることが分かった。全日にわたって航行中に減速した船の数は 44 隻であった。減速した船舶のうちに半分以上は午後に航行した船で、その数は 28 隻であった。以下に最適航路を航行することで安全に航走できたいくつかの場合について示す。

実際の交通状況では、午後において東京・千葉方面からの南航船が多いため、横浜へ向かう船舶がこの南航船の流れをどのように横切るかは問題となっている。Fig. 6.2.15 にその一例を示す。Fig. 6.2.15 において、水色の航路は自船の最適航路であり、船をバンパーで表示する。Fig. 6.2.15 に示すように、この船は最適航路の上で中ノ瀬航路を出て横浜沖へ向かっているが、

南航船を安全に避けるために大きく迂回せざるを得なかった。このような航路を取るのは午後
にのみあるのではなく、Fig. 6.2.16 に示すように午前中にも中ノ瀬航路を出て真っ直ぐに横浜
へ向かわずに北航して南航船を避けてから目的地へ航行する場合があった。実際の航行におい
て既に第5章に述べたように横浜沖では午前中にも午後にも危険な見合い関係が多発したので、
最適航路では危険な遭遇を避けるためにこのように遠回りする航路を取るようになったと考
えられる。

次に、浦賀水道航路北航レーンを出て横浜へ向かう船舶が最適航路上で早めに左転して北航
することにより南航船の流れを安全に横切れた場合を Fig. 6.2.17 に示す。しかし、Fig. 6.2.18
に示す場合では、自船は、南航船群が航過するのを待つために浦賀水道航路北航レーンを出て
からしばらくそのまま北航し、安全なタイミングに左転して横浜方面へ向かった。最適航路は
遭遇状況に対して戦略的に対応することができたと考えられる。

また、Fig. 6.2.19 に根岸から浦賀水道航路南航レーンに入航する船が航路の入り口付近で減
速して東京方面からの南航船が航路に入るのを待機する場合を示す。Fig. 6.2.19 から分かるよ
うに南航レーンに入航する他船が多いので、根岸から南航する船舶の操船者にとっては入航す
るタイミングが難しいものとなる。Fig. 6.2.19 が示しているように、根岸から南航するこの2
隻は航路の入り口付近に減速して東京方面からの南航船の間に割り込んで入航した。加えて、
木更津から南航する場合を Fig. 6.2.20 に示す。Fig. 6.2.20 に示すように水色の最適航路を航
行する自船は、南航船の流れと合流するために木更津港沖のブイから減速して自船の右舷に航
行している大型船の後方を航行した。

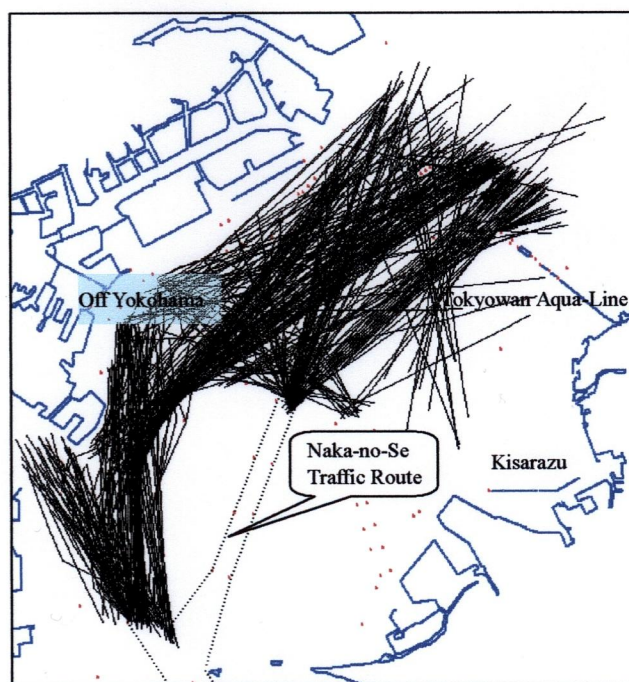


Fig. 6.2.12 The optimal routes of all ships equipped with ATMS
in Tokyo Bay in the whole day (00:00 ~ 23:59)

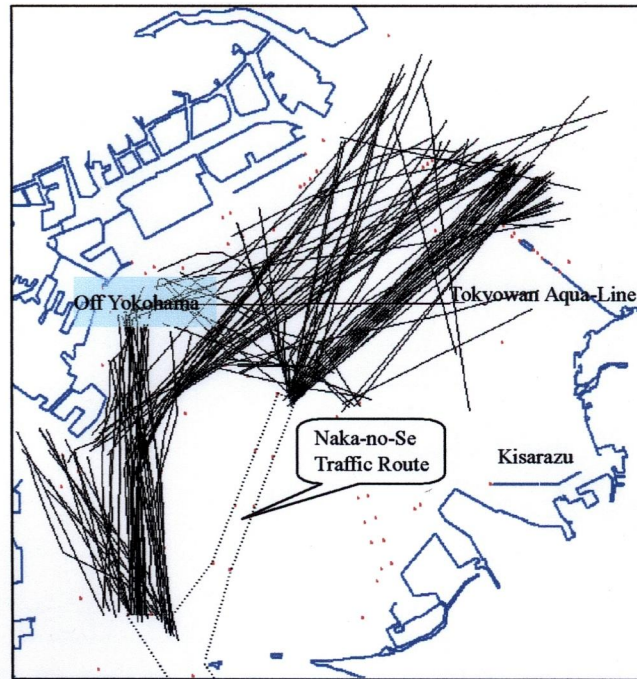


Fig. 6.2.13 All optimal routes in the morning (00:00 ~ 12:00)

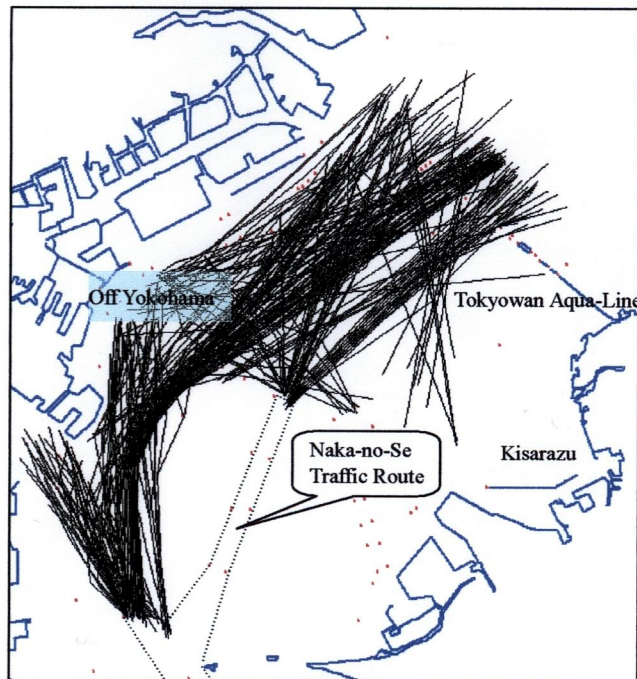


Fig. 6.2.14 All optimal routes in the afternoon (12:00 ~ 23:59)

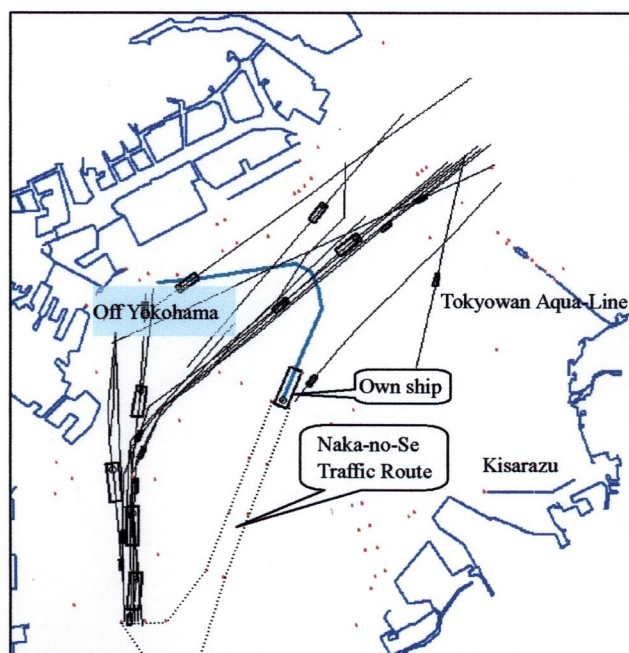


Fig. 6.2.15 The optimal route of ship from Naka-no-Se Traffic Route to Off Yokohama in the afternoon (16:45)

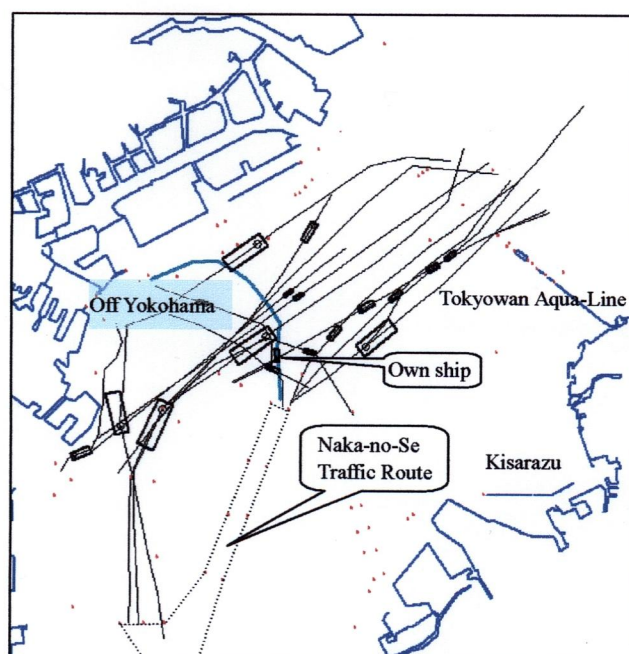


Fig. 6.2.16 The optimal route of ship from Naka-no-Se Traffic Route to Off Yokohama in the morning (07:14)

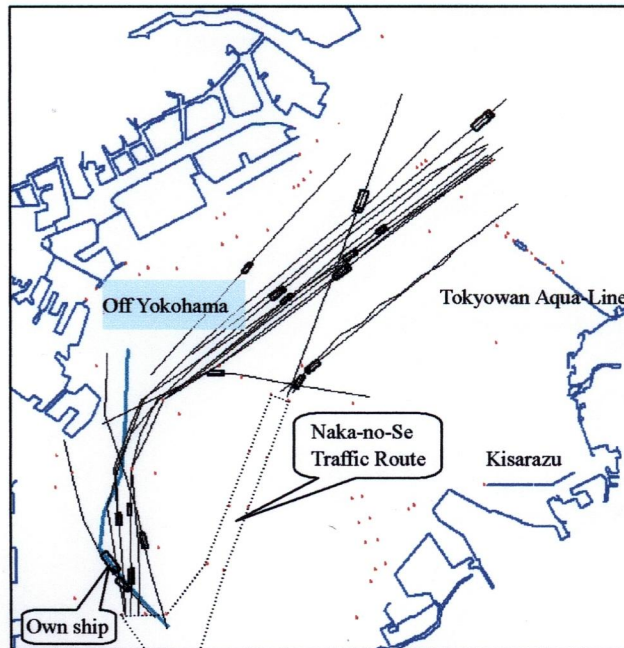


Fig. 6.2.17 The optimal route of ship from Uruga Suido Northbound Lane to Off Yokohama (19:21)

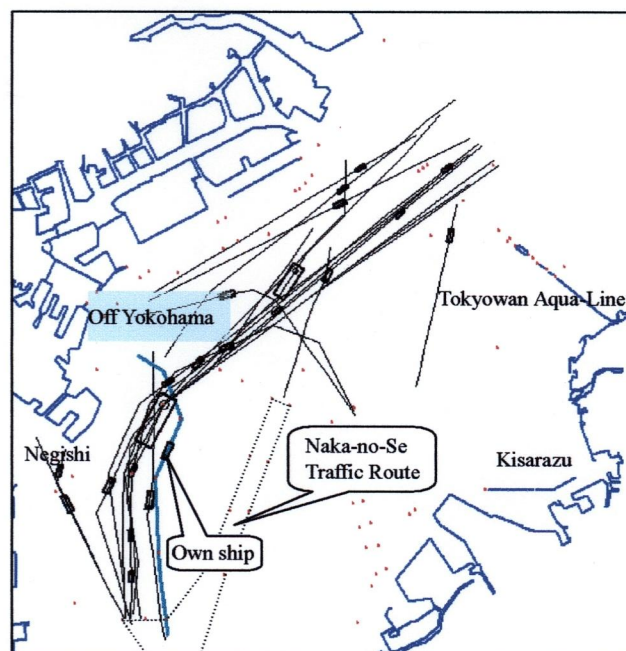


Fig. 6.2.18 The optimal route of ship from Uruga Suido Northbound Lane to Off Yokohama (16:00)

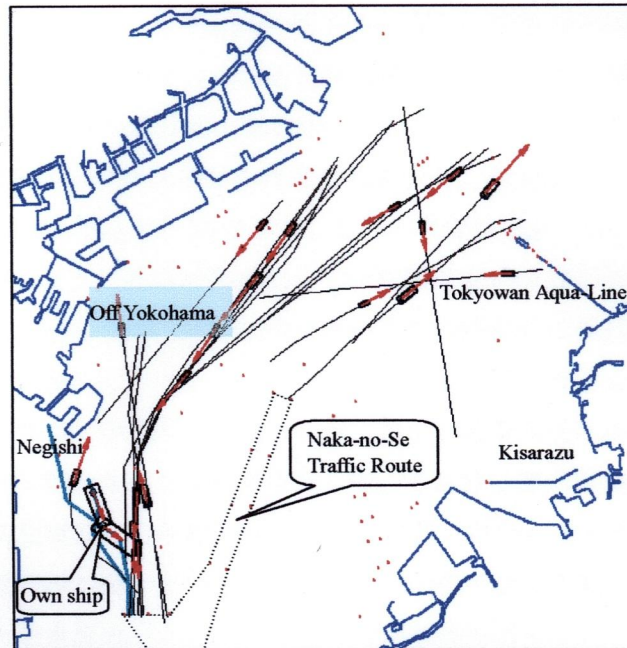


Fig. 6.2.19 The optimal routes of ships from Negishi to Uraga Suido
Southbound Lane on which they reduced speed (12:58)

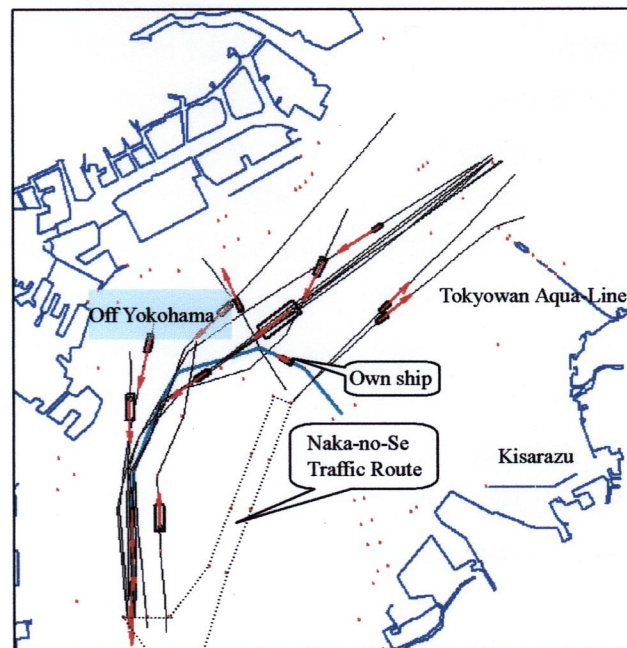


Fig. 6.2.20 The optimal route of ship from Kisarazu to Uraga Suido
Southbound Lane on which own ship reduced speed (21:11)

次に、全船が ATMS に参加して最適航路を航行した場合、海域の安全性・効率性がどのように改善できるかを検討する。

第一には、式 (5.1.1) を用い、危険船舶の密度を計算して密度分布図を示す。実航路を航行した場合と最適航路を航行する場合における危険船舶の密度を比較しやすくするために、ここで危険船舶の密度を表わす色の濃淡度を実航路の場合と同じものにした。

SJ 値によって危険と判定された船舶の密度分布を全日、午前および午後に分けてそれぞれを Fig. 6.2.21、Fig. 6.2.22、Fig. 6.2.23 に示す。これらの図を Fig. 5.3.6、Fig. 5.3.7、Fig. 5.3.8 と比較すると、明らかなように最適航路においては危険船舶の密度が低くなったことが分かった。Fig. 6.2.21 により、全日では、最適航路においての危険船舶は横浜沖および浦賀水道航路南航レーン入り口付近に集中したことが分かった。Fig. 6.2.22 に示すように、午前中においては東水路南航レーン入り口、中ノ瀬航路出口付近、および浦賀水道航路南航レーン入り口付近に SJ 値によって危険と判断された船舶が存在した。これは、東水路南航レーン入り口と中ノ瀬航路出口付近では出発時に多くの船が既に近くに存在したからである。また、浦賀水道航路南航レーン入り口付近では渋滞を防ぐためにバンパーの前方長を短縮したことによる。午前中の実航路では横浜沖と東水路北航レーン入り口に危険船舶が存在したものの、最適航路においては Fig. 6.2.22 によりこれらの海域に危険船舶が存在しなかったと分かった。Fig. 6.2.23 に示すように、今回用いたデータには午後に様々な方向から浦賀水道航路南航レーンに入航する航船が多いため、最適航路においても浦賀水道航路南航レーン入り口付近では危険船舶の密度が最高となった。

また、バンパーモデルによって危険と判定された船舶の密度分布を全日、午前および午後に分けてそれぞれを Fig. 6.2.24、Fig. 6.2.25、Fig. 6.2.26 に示す。最適航路においてバンパーモデルによって判定された危険船舶の密度を表わす濃淡度は、実航路においての交通評価に用いた濃淡度と同じ値であるので、Fig. 5.3.9、Fig. 5.3.10、Fig. 5.3.11 と比較すれば、明らかなように最適航路の上ではバンパーが重なる危険性が少なくなった。Fig. 6.2.25 に示すように、午前中は多くの船が中ノ瀬航路から同時にるので、最適航路においても出発時点に既に他船とのバンパーが重なっていたことが分かった。この場合に対しては、最適航路計算では出発時他船とのバンパーが既に重なっていても他の衝突の危険判定で安全であれば航行させることにした。Fig. 6.2.25 と Fig. 6.2.22 と比較すれば、バンパーモデルによる危険船舶の分布が少ない。SJ 値ではバンパーが重なっていない状態に対しても危険な遭遇であると判断するが、バンパーモデルでは自船と他船のバンパーが重なった状態を危険とするので、この結果となった。また、Fig. 6.2.26 から分かるように、午後には多くの船が浦賀水道航路南航レーンに同時に入航するため、午前中と比べて航路の入り口付近では数多くのバンパーが重なった。最適航路計算では、船舶同士のバンパーが重ならないように設定したが、Fig. 6.2.1 に示したエリアではバンパーの前方長を 2.5 L まで短縮して航路の入り口付近の渋滞を防いだ。そのため、浦賀水道航路南航レーン入り口付近では最適航路の上を航行しても、交通評価を行うときに前方長 5 L のバンパーモデルによって危険と判定された船舶が存在した。

同様に、DCPA・TCPA によって危険と判定された船舶の密度分布を全日、午前および午後に分けてそれぞれを Fig. 6.2.27、Fig. 6.2.28、Fig. 6.2.29 に示す。これらの図を Fig. 5.3.13、Fig. 5.3.14、Fig. 5.3.15 と比較すれば、明らかなように最適航路においては DCPA・TCPA によって危険であると判断された船舶の密度が下がり、また分布の範囲も小さくなった。午前中に関して、バンパーモデルによる危険船舶の密度分布を表す Fig. 6.2.25 と DCPA・TCPA による危険船舶の密度を表す Fig. 6.2.28 と比較すれば、中ノ瀬航路出口付近と東水路南航レーン入り口付近にバンパーが重なったのに対して DCPA・TCPA によって危険と判定されなかった。これは、バンパーが重なっていた状態で 2 船が離れていくかまたは平行に航行する場合に対して DCPA・TCPA では危険と判定されないことによるものである。しかし、Fig. 6.2.28 が示しているように、横浜沖には DCPA・TCPA による危険船舶が存在した。最適航路の計算においては、横浜港からの南航船に対して Fig. 6.2.4 に示した第一ステージまでに三つの衝突の危険判定にどれかが安全であれば航行させたので、この結果となった。午後において、中ノ瀬の西側の海域および浦賀水道航路南航レーン入り口付近では危険船舶の密度が最高となった。このエリアではバンパーの前方長を短縮してバンパーの条件のみを考慮して船を航走させたので、DCPA・TCPA によって衝突の危険があると判断されたと考えられる。また、中ノ瀬の西側の海域は様々な方向からの船舶が合流するところでもあるからである。

全体的には、実航路における危険船舶の密度分布図と比較すると、全船が徐々に ATMS に参加して最適航路を航行することにより海域の安全性が改善できたと言える。

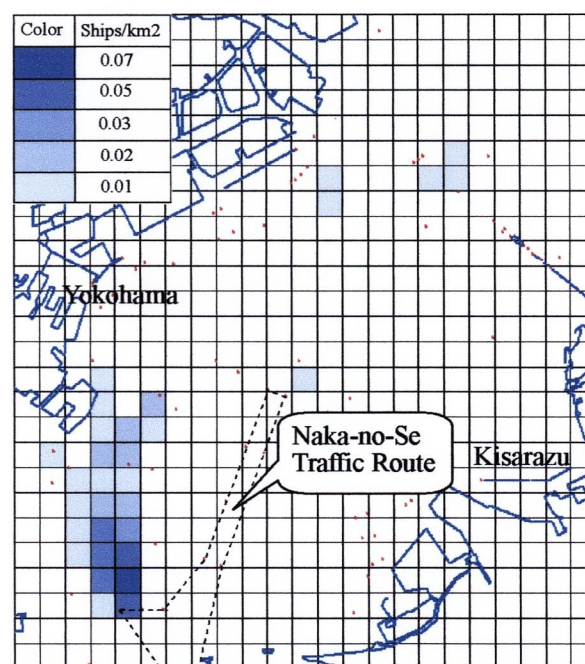


Fig. 6.2.21 Distribution of dangerous ships judged by SJ value on the optimal routes in the whole day (00:00 ~ 23:59)

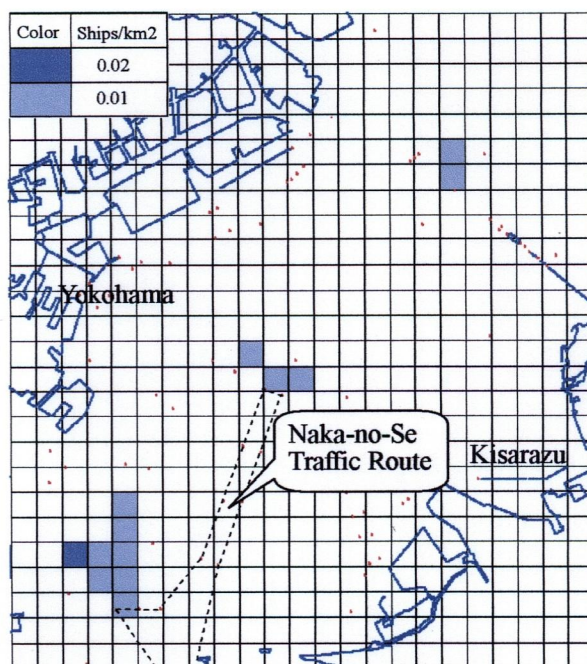


Fig. 6.2.22 Distribution of dangerous ships judged by SJ value on the optimal routes in the morning (00:00 ~ 12:00)

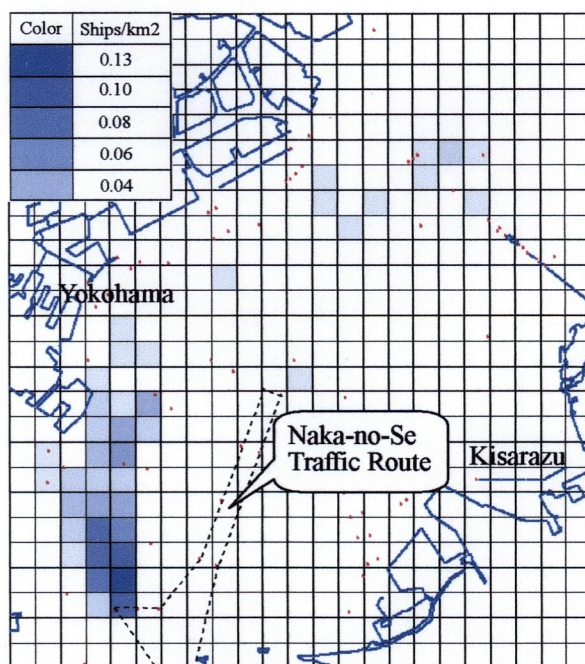


Fig. 6.2.23 Distribution of dangerous ships judged by SJ value on the optimal routes in the afternoon (12:00 ~ 23:59)

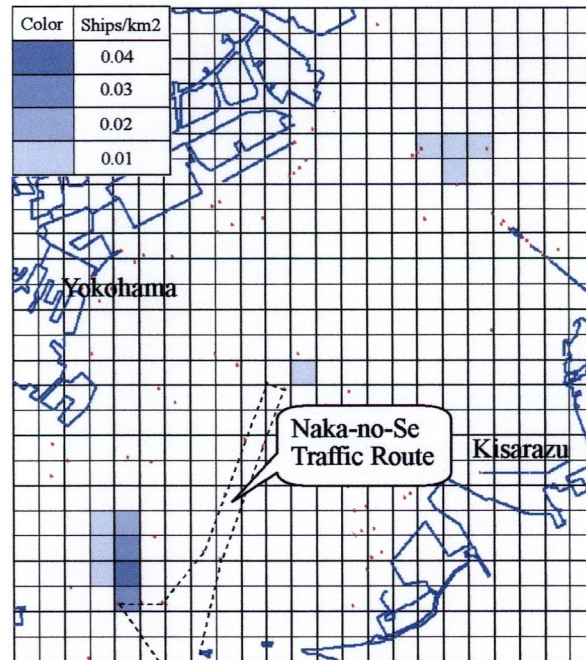


Fig. 6.2.24 Distribution of dangerous ships judged by Bumper Model on the optimal routes in the whole day (00:00 ~ 23:59)

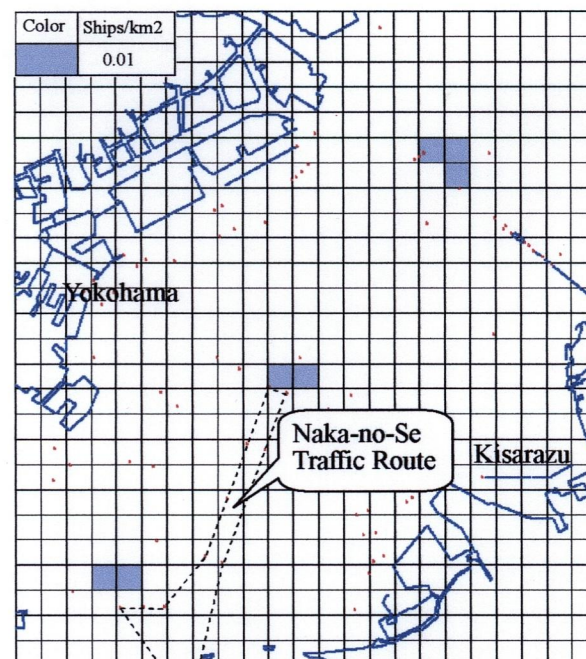


Fig. 6.2.25 Distribution of dangerous ships judged by Bumper Model on the optimal routes in the morning (00:00 ~ 12:00)

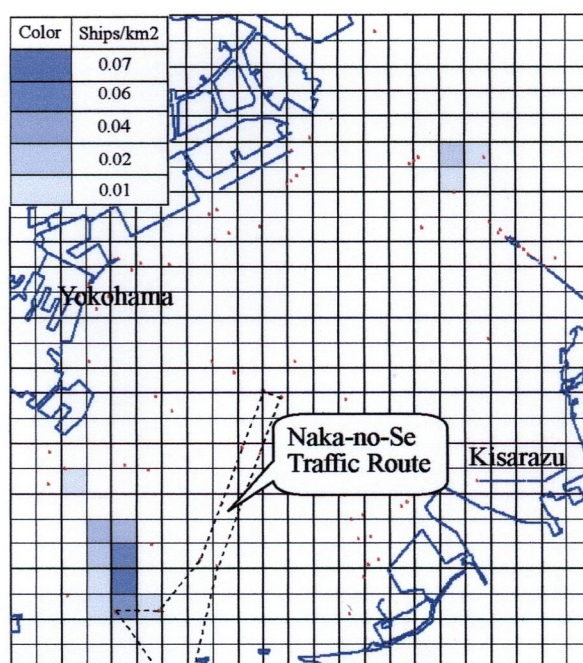


Fig. 6.2.26 Distribution of dangerous ships judged by Bumper Model on the optimal routes in the afternoon (12:00 ~ 23:59)

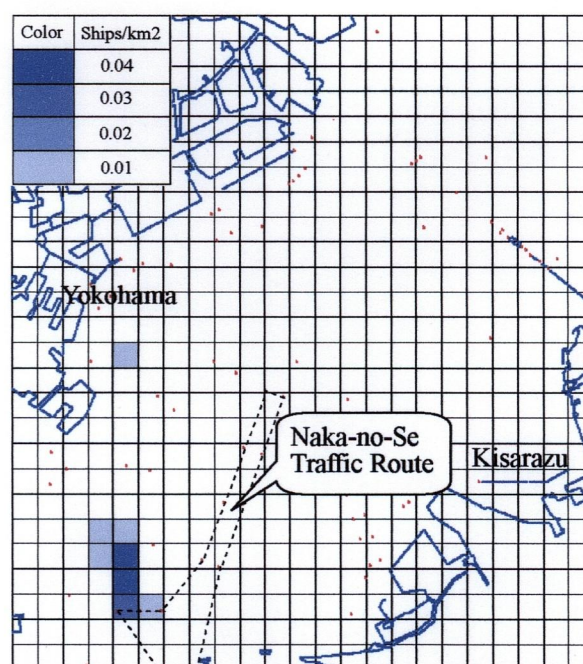


Fig. 6.2.27 Distribution of dangerous ships judged by DCPA • TCPA on the optimal routes in the whole day (00:00 ~ 23:59)

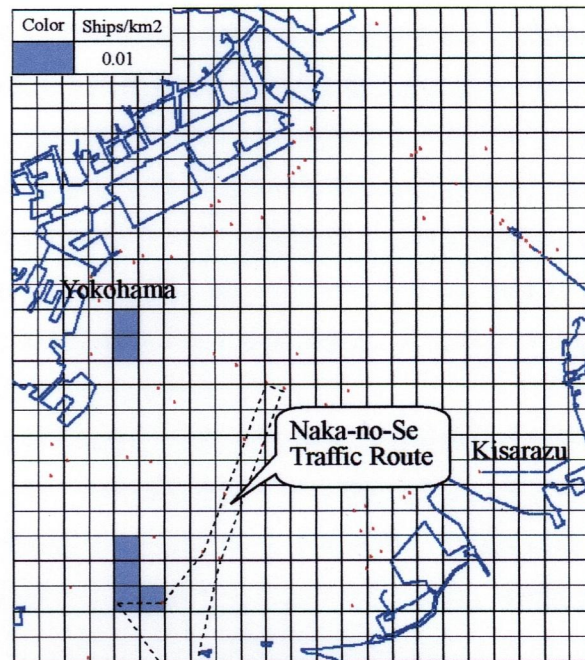


Fig. 6.2.28 Distribution of dangerous ships judged by DCPA • TCPA on the optimal routes in the morning (00:00 ~ 12:00)

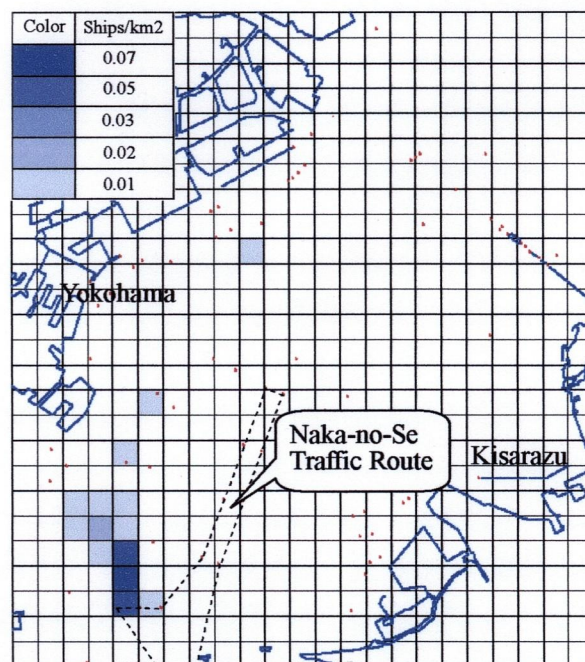


Fig. 6.2.29 Distribution of dangerous ships judged by DCPA • TCPA on the optimal routes in the afternoon (12:00 ~ 23:59)

第二には、最適航路を航行するにあたって海域の危険率がどの程度改善できるかを検証する。式 (5.1.2) を用いて危険率を計算し Table 6.2.1 にまとめた。また、午前と午後について詳しく考察を行うために、それぞれの危険率を計算し Table 6.2.2 と Table 6.2.3 にまとめた。

Table 6.2.1 から分かるように最適航路を航行することにより、全日において海域全体では、SJ 値、バンパーモデル、DCPA・TCPA による危険率をそれぞれ 11.5%、6.08%、3.90%減らすことができた。Table 6.2.2 と Table 6.2.3 から明らかなように、実航路において午前の危険率と比べて午後の危険率が高かったため、最適航路を航行する場合に改善された危険率は全体的に午後の方が高くなった。また、SJ 値、バンパーモデル、および DCPA・TCPA による危険率のうちには SJ 値による危険率が最も改善できた。次はバンパーモデルによるものであり、最後は DCPA・TCPA によるものである。

最適航路において、改善された DCPA・TCPA による危険率は改善されたバンパーモデルによる危険率より少なかった。その原因は第 5 章の Fig. 5.3.5 に示したバンパーがまだ重なっていても 3.2 倍の平均船長である DCPA と 5 分以内の TCPA になった場合があり、そのとき DCPA・TCPA では危険として計算することにある。また、最適航路の計算では、追い越し（針路差が 10° 以内）および行き合い（針路差が 170° 以上）の場合にのみ DCPA・TCPA を計算したが、交通評価を行う時はすべての見合い関係に対して行ったためである。

全船が最適航路上を航行しても、午前も午後も共に危険船舶がまだ存在し、また危険率を 0% にすることができなかった理由は次のとおりである。

- ① 出発地点から最初のグリッドまでの計算では、バンパー、SJ 値、および DCPA・TCPA を計算して、バンパーが重なっていても他の衝突の危険判定で安全であれば、船を航行させた。
- ② 最適航路の計算において、横切りの場合は DCPA・TCPA による衝突の危険判定を行わなかったが、交通評価を行う場合はすべての見合い関係に対して DCPA・TCPA を計算した。
- ③ Fig. 6.2.1 に示した浦賀水道航路南航レーン手前のエリアでは、最適航路計算においてバンパーの前方長を $2.5 L$ にしたが、交通評価を行う場合は前方長 $5 L$ のバンパーを用いた。
- ④ 横浜沖は、午後の時間帯に横浜港から南航する船舶と東京・千葉方面から南航する船舶が合流するところとなる。両者とも同じ方向へ向かって浦賀水道航路に入航するのに、SJ 値による判断では横切りの見合い関係となり、危険なケースが多すぎて航行できなくなってしまう。そこで、最適航路計算では、横浜港から南航する船舶に対して SJ 値による衝突危険判定は他船との針路差が 40° 以上の場合にのみ行うこととした。しかし、交通評価を行う場合は、針路差 10° 以上の場合について行った。

したがって、最適航路では、実海域において危険率を 0%にするのが非常に難しいこととなる。しかし、何れの評価指標においてもこれらの航路を航行することによって海域の危険率を改善したことを確認できた。

Table 6.2.1 The dangerous rates on the actual and optimal route in the whole day

Type of danger	Dangerous rate on the actual route	Dangerous rate on the optimal route	Improved rate
SJ value < -1.0	17.01 %	5.51 %	11.50 %
Bumper overlapping	7.73 %	1.65 %	6.08 %
DCPA • TCPA	5.76 %	1.86 %	3.90 %

Table 6.2.2 The dangerous rates on the actual and optimal route in the morning

Type of danger	Dangerous rate on the actual route	Dangerous rate on the optimal route	Improved rate
SJ value < -1.0	9.04 %	1.97 %	7.07 %
Bumper overlapping	4.41 %	0.82 %	3.59 %
DCPA • TCPA	3.78 %	1.17 %	2.61 %

Table 6.2.3 The dangerous rates on the actual and optimal route in the afternoon

Type of danger	Dangerous rate on the actual route	Dangerous rate on the optimal route	Improved rate
SJ value < -1.0	21.33 %	7.42 %	13.91 %
Bumper overlapping	9.53 %	2.10 %	7.43 %
DCPA • TCPA	6.83 %	2.23 %	4.60 %

第三には式 (5.1.3) を用いて交通の効率性について考察を行った。その結果を Table 6.2.4 にまとめた。Table 6.2.4 に示すように、交通効率は、全日では僅かに 0.028% 上がった。これは、狭い東京湾内において最適航路を航行する船舶が安全面を優先して減速したので、最適航路の航海時間と実航路の航海時間との差があまりなかったからである。特に、午後の時間帯には船舶が減速して危険な遭遇を避ける場合が多いため、最適航路の総航海時間は実航路の総航海時間と比べて 0.5 分間長くなった。そのため、午後においては効率性が改善できなかった。

Table 6.2.4 The efficiency of passage time on the optimal route

Period of time	24 hours	00:00 ~ 12:00	12:00 ~ 23:59
The improved efficiency	0.028 %	0.089 %	-0.004 %

さらに、総航海距離を計算し、その結果を Fig. 6.2.30 に示す。Fig. 6.2.30 において、実航路の総航海距離を赤色で、また最適航路の総航海距離を水色で表示する。最適航路と実航路との総航海距離の差は 27.48 miles であった。これは最適航路の上を航行する船が目的地まで多くの変針をあまり必要としないからであると考えられる。

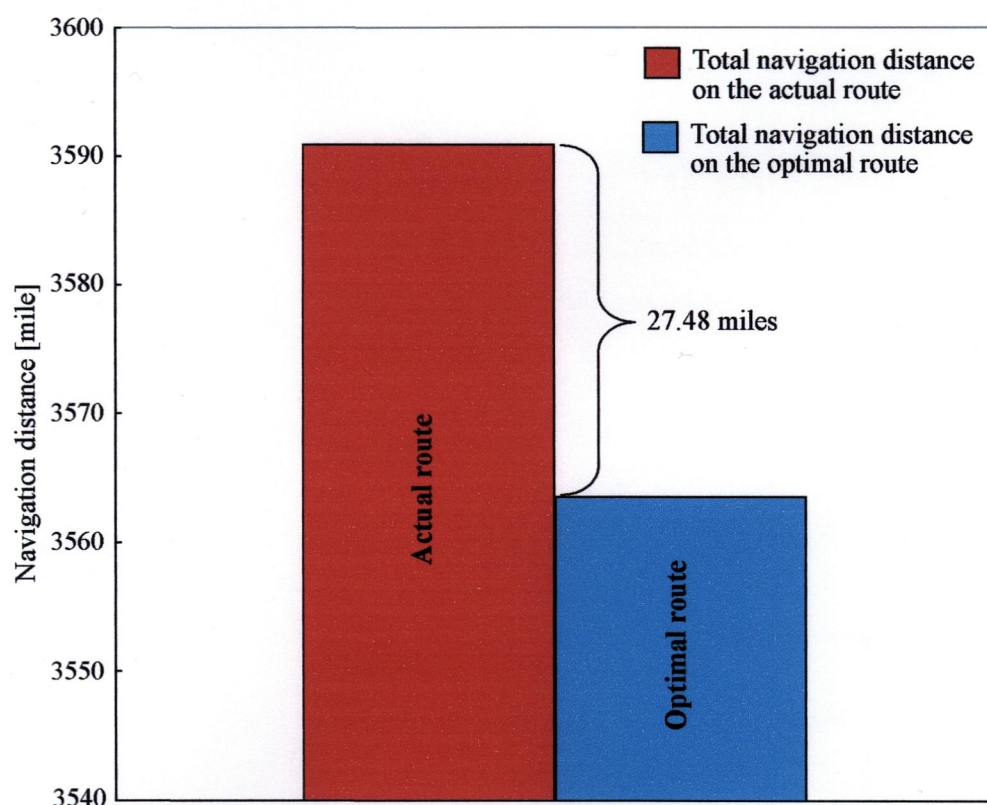


Fig. 6.2.30 The navigation distance on the actual and optimal route

第7章 最適航路から偏れた場合の再計算方法

実際の航行においては最適航路を航行している間に何かの原因で自船が航路から大きく偏れることが考えられる。この章では、このような場合に対して最適航路の再計算方法をどのようにするかについて説明し、また最適航路を再計算するシミュレーションを行い、その結果を示す。

7.1 最適航路の再計算アルゴリズム

ある船が最適航路を計算してその航路の上を航行している間に、航路からある程度離れた場合は、その船の最適航路を再計算するとする。その再計算アルゴリズムを Fig. 7.1.1 に示す。

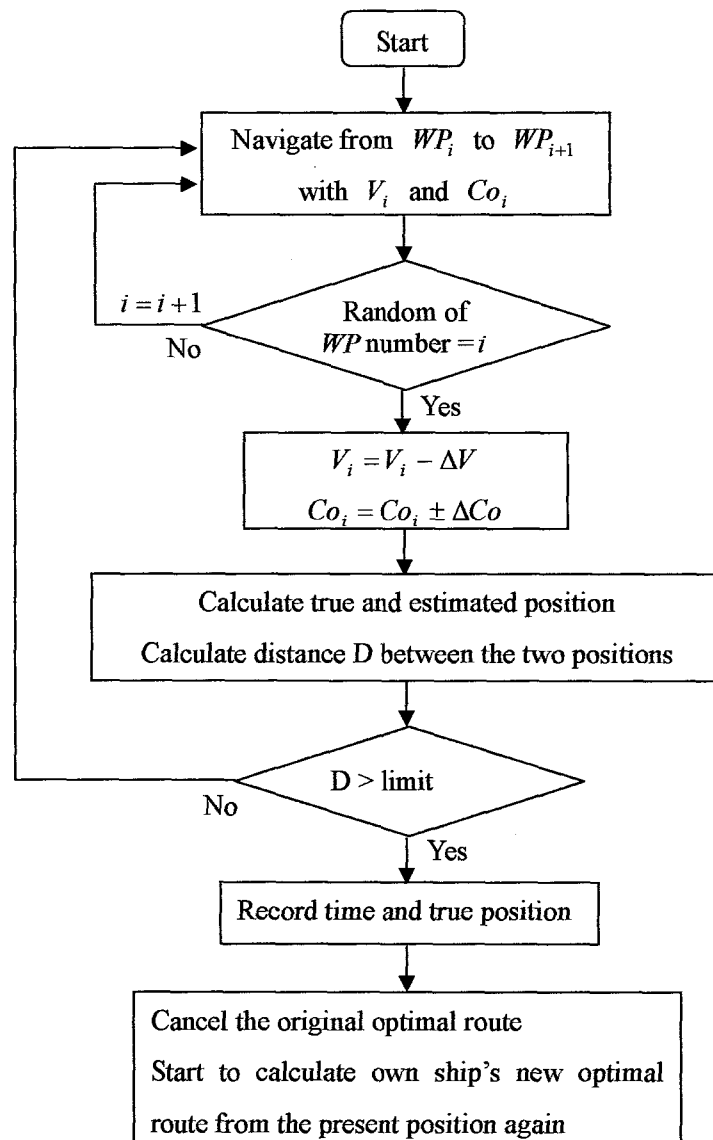


Fig. 7.1.1 The algorithm to recalculate optimal route of ship that deviated from its original route

プログラムでは、Fig. 7.1.1 に示すように既に ATMS システムに参加していた任意の船を最適航路の WP_i (Way point) から WP_{i+1} へ航行させる時、 WP_i とズレを発生させるウェイポイントと一致すれば減速させるため自船の速力に「 $-\Delta V$ 」を加え、また針路には遭遇によって「 $\pm\Delta Co$ 」を加える。自船の速力を増速させないのは、実際の航行において他船と衝突の危険性が発生した場合に増速するのではなく基本的に減速するからである。自船が減速しながら右転もしくは左転してしばらく航行させる。予定速力と予定針路で進む場合の位置と実位置との距離差を計算し、その差が予め設定した距離より大きければ、実位置とその時間を記録する。続いて、自船が一旦元の最適航路を放棄し、その位置から再びシステムに参入して、既にシステムに参加している他船の予定航路を考慮して新たな最適航路を計算するものとする。

このアルゴリズムを使用していくつかの場合について自船の最適航路を再計算し、その結果を以下に示す。

7.2 最適航路の再計算するシミュレーション結果

Fig. 7.1.1 に示したように、船を航路から偏れさせるためには自船の速力および針路に誤差を発生させる。予定位置と実際の位置との差が 0.3 mile また 0.6 mile になったとき、いくつかのケースについて最適航路を再計算するシミュレーションを行った。

まず、第 6 章の Fig. 6.1.5 に示した最適航路に対する再計算シミュレーション結果を示す。Fig. 7.2.1 には自船が元の最適航路より右へ 0.3 mile 偏れた場合において、元の最適航路と再計算した最適航路を示す。Fig. 7.2.1 に示すように、再計算した最適航路と元の最適航路は大きく異なることが分かった。また、自船が左へ 0.3 mile 偏れた場合のシミュレーション結果を Fig. 7.2.2 に示す。Fig. 7.2.1 と Fig. 7.2.2 より分かるように、左右に 0.3 mile 偏れた場合の再計算した結果は同じ経路となった。自船が元の最適航路から右又は左へ 0.3 mile 偏れた後、他船との遭遇状況は殆ど変わらなかったため、この結果となった。

同様に、自船が最適航路から左右へ 0.6 mile 偏れた場合においてシミュレーションを行った。Fig. 7.2.3 に右へ偏れた場合を、Fig. 7.2.4 に左へ偏れた場合を示す。Fig. 7.2.4 に示す再計算した最適航路は、Fig. 7.2.1 と Fig. 7.2.2 に示すものと殆ど同じ経路である。しかし、Fig. 7.2.1、Fig. 7.2.2、および Fig. 7.2.4 に示すものと比較すると、Fig. 7.2.3 に示す再計算した航路は明らかに異なるものである。これは自船が右へ 0.6 mile 偏れたことによって他船との遭遇状況が変わったからである。このシミュレーションでは再度システムに参加した自船より後でシステムに参入する船舶の最適航路は元のものと変わらなかった。

また、再計算した最適航路の形状が異なった二つの最適航路群について考察を行った。その結果、自船が右へ 0.3 mile 偏れた場合の最適航路群を Fig. 7.2.5 に、右へ 0.6 mile 偏れた場合の最適航路群を Fig. 7.2.6 に示す。Fig. 7.2.5 と Fig. 7.2.6 において、右へ 0.3 mile 偏れた場合と比べて右へ 0.6 mile 偏れたことによって日本船長協会の自主設定の分離通航帯の付近における遭遇状況が変わるため、両図に示す最適航路が異なることとなった。

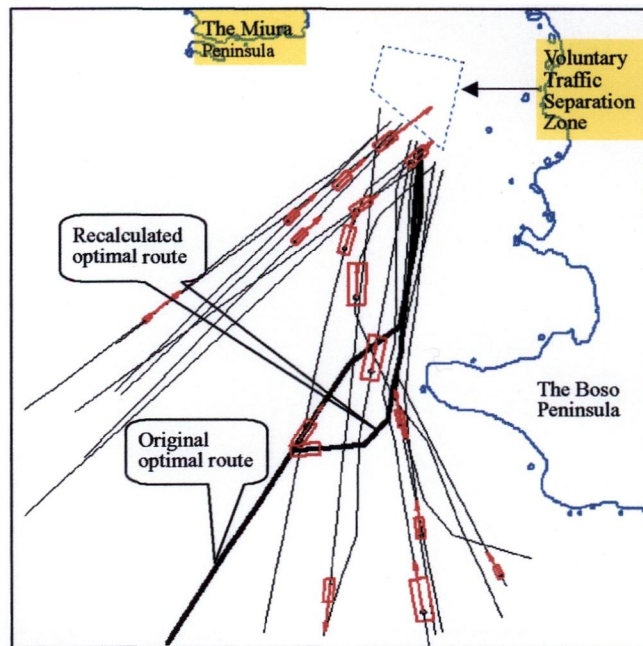


Fig. 7.2.1 The recalculated optimal route of ship that deviated to the right 0.3 mile (03:28:10)

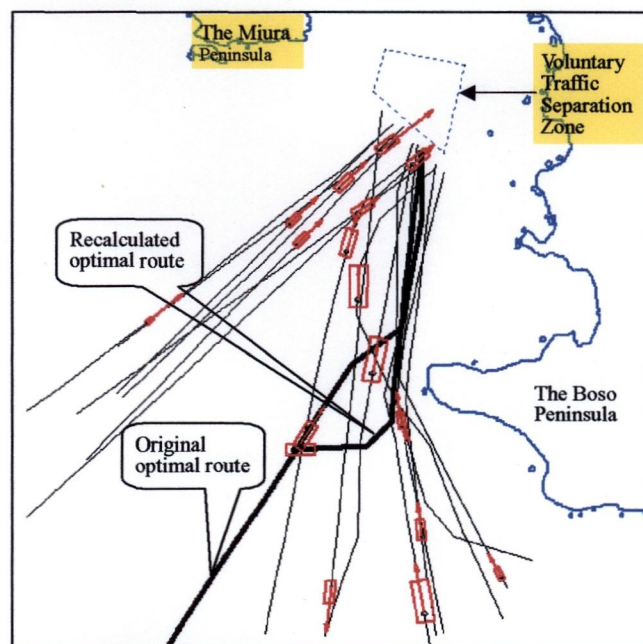


Fig. 7.2.2 The recalculated optimal route of ship that deviated to the left 0.3 mile (03:28:10)

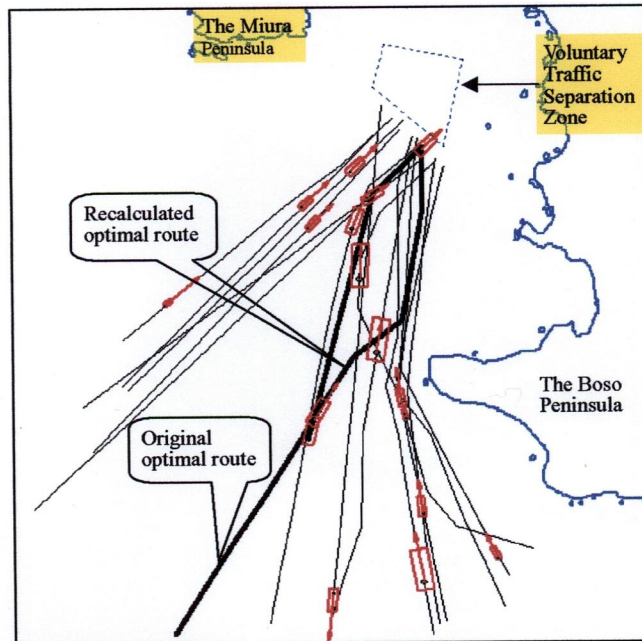


Fig. 7.2.3 The recalculated optimal route of ship that deviated to the right 0.6 mile (03:30:10)

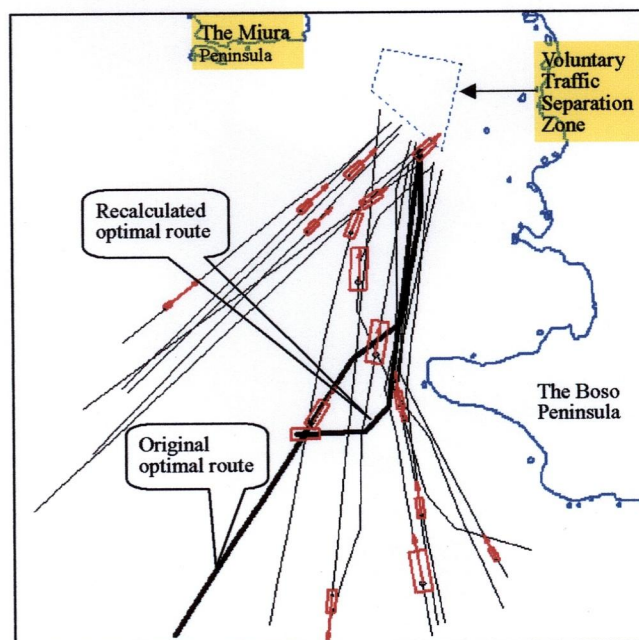


Fig. 7.2.4 The recalculated optimal route of ship that deviated to the left 0.6 mile (03:30:10)

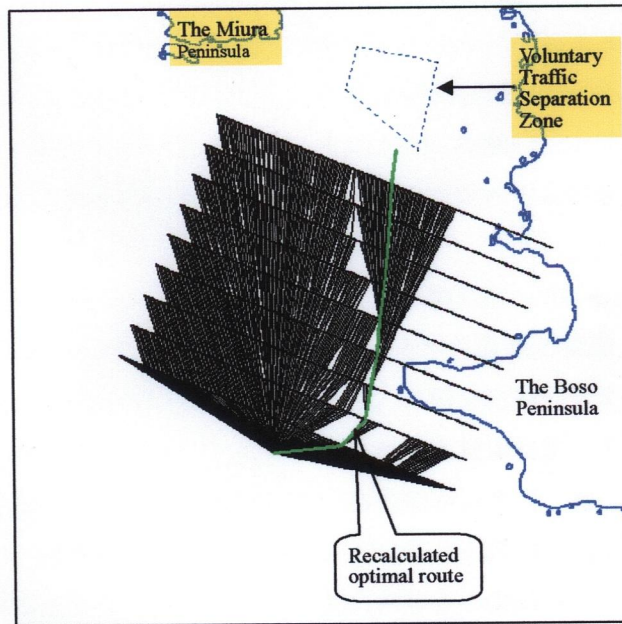


Fig. 7.2.5 The group of recalculated optimal routes to the last stage of ship that deviated to the right 0.3 mile

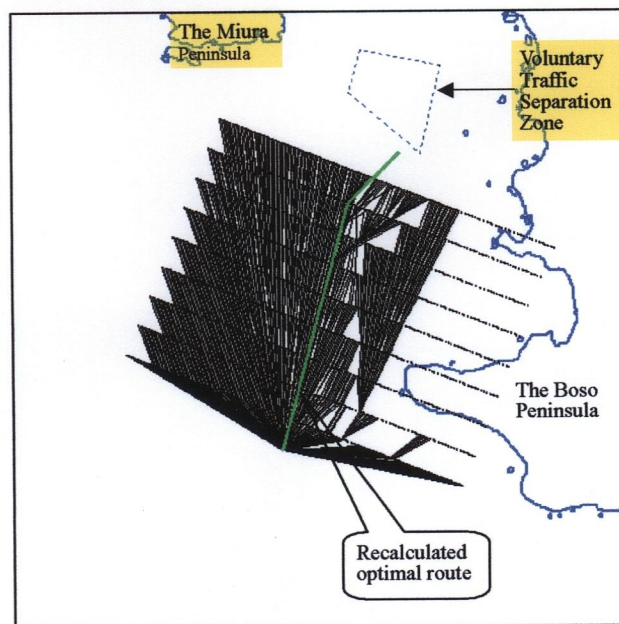


Fig. 7.2.6 The group of recalculated optimal routes to the last stage of ship that deviated to the right 0.6 mile

さらに、別の船について最適航路の再計算シミュレーションを行い、その結果を次に示す。Fig. 7.2.7、Fig. 7.2.8、Fig. 7.2.9、および Fig. 7.2.10 には自船がそれぞれ左右へ 0.3 mile また左右へ 0.6 mile 偏れた場合の再計算の航路を示す。これらの図により、自船が元の最適航路から偏れてから再び計算した最適航路は殆ど元の最適航路と同じものとなった。これは、自船が航路から偏れた後、自船の両側を航行している船と平行に航行できたことによる。このシミュレーションでは、最適航路の再計算をした船舶より後でシステムに参入する船舶の最適航路が元のものとは変わらなかった。

再計算した最適航路らは殆ど同じ経路であるため、自船が右へ 0.3 mile 偏れた場合にのみ考察を行った。この場合において、再計算を行った位置から最後の直線上までの最適航路群を Fig. 7.2.11 に示す。Fig. 7.2.11 から明らかなように、自船の右舷の近くを北航している他船が自船に対して優先権を持つようになったため、再計算した最適航路の右側に最適航路群が存在しなかった。また、自船の左舷前方を航行している他船がいたが、他船から自船までかなり安全な距離があったため、再計算した最適航路の左側に最適航路群が存在した。

このように、自船が最適航路を航行している間に何らかの原因でその航路から偏れても、偏れた位置から最適航路を再計算することができた。再度システムに参加するときの遭遇状況によって、再計算される航路は元のものとはかなり違う場合もあれば、元のものとは殆ど同じ航路となる場合もあることが分かった。

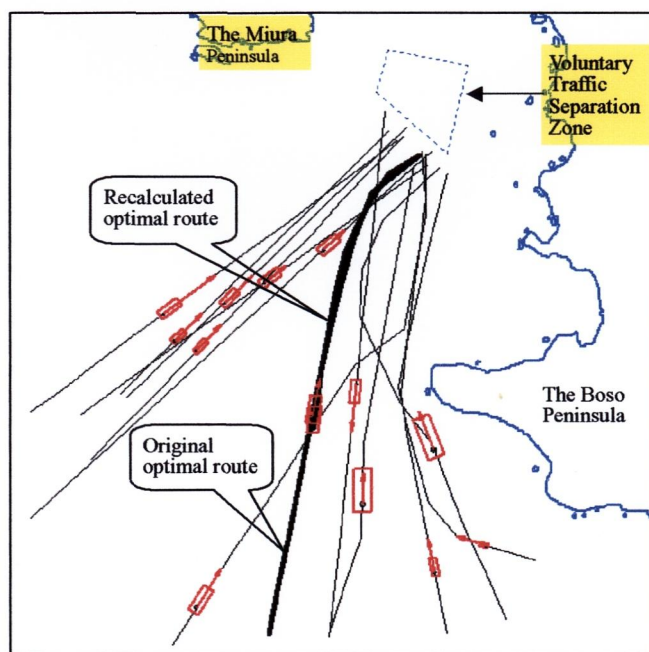


Fig. 7.2.7 The recalculated optimal route of ship that deviated to the right 0.3 mile (03:06:50)

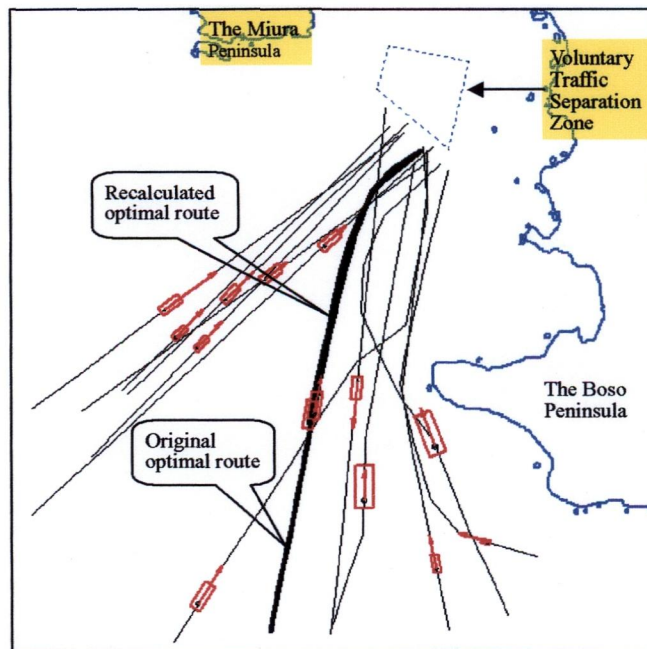


Fig. 7.2.8 The recalculated optimal route of ship that deviated to the left 0.3 mile (03:06:50)

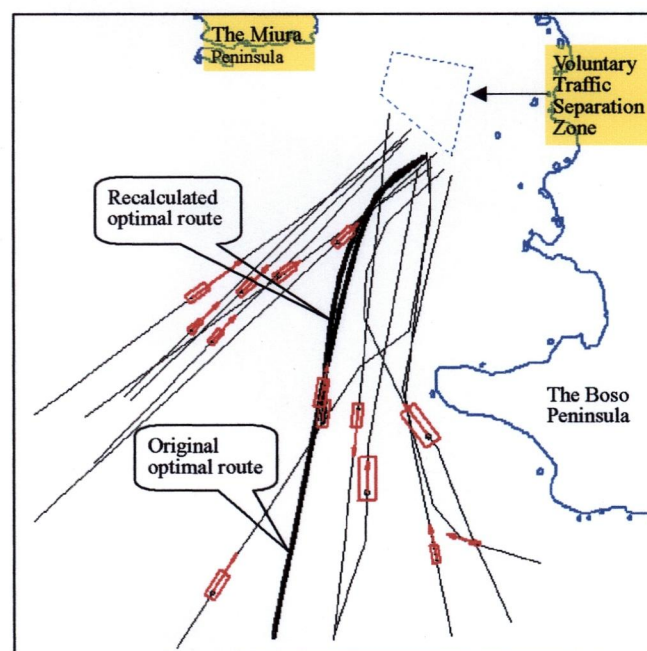


Fig. 7.2.9 The recalculated optimal route of ship that deviated to the right 0.6 mile (03:09:10)

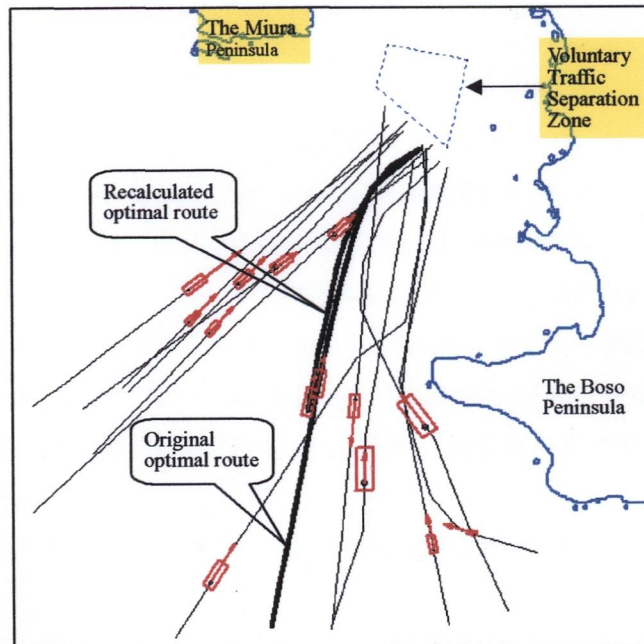


Fig. 7.2.10 The recalculated optimal route of ship that deviated to the left 0.6 mile (03:09:10)

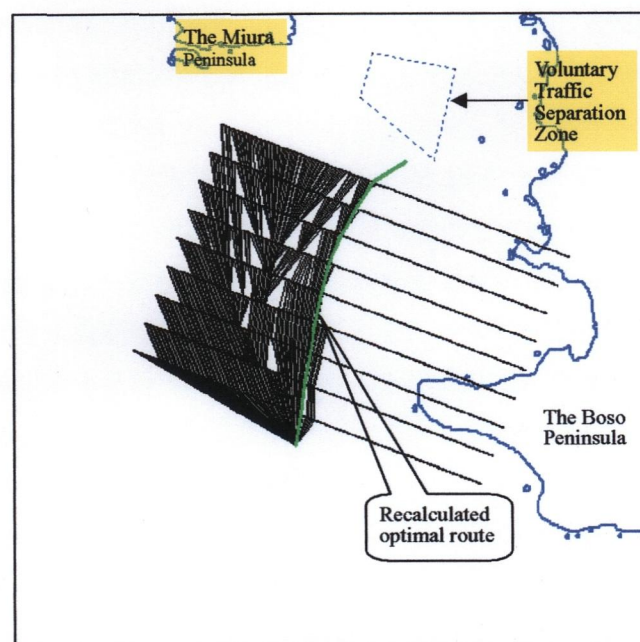


Fig. 7.2.11 The group of recalculated optimal routes to the last stage of ship that deviated to right 0.3 mile

第8章 本論文の結論及び今後の課題

8.1 本論文の結論

本研究では、AIS による予定航路情報と航海情報に基づきバンパーモデル、SJ 値、DCPA・TCPA を衝突の危険を判定する指標として、自船の最適航路を求める方法を開発した。最適航路の有効性を確認するためには、いくつかの仮想的な遭遇状態、AIS データおよび東京海洋大学の東京湾リモートレーダネットワークシステムによるレーダ観測から得られた実際の遭遇状態を基にシナリオを作成してシミュレーションを行った。さらに、開発した ATMS システムの有効性を検証するためには、任意の海域において実船舶交通データを用いてシステムを導入する前と導入した後の交通評価を行った。その結果、最適航路を自動的に決定する ATMS システムの有効性を検証できた。

以下では、各章で述べた内容および得られた結論を総括すると共に、今後の検討課題について述べる。

第1章では、序論として海上輸送が日本にとってかけがえのない存在でありながら、船舶における現在の様々な問題によって海難事故を引き起こし、その事故が惨事であることを示した。また、海上での事故を減少するために新技術の導入の必要性を強調し、本研究の目的と概要について述べた。

第2章では、本研究で開発したシステムに用いた心臓とも言える AIS について述べた。島影や半島が多く存在する交通環境の中では他船の行動を把握するのにレーダのみでは不十分であることから、他船の情報を得るために AIS がスウェーデンで開発された。AIS の最大の特徴としては、150 MHz 帯 VHF で情報を送受信するため広範囲に渡る通信が実現でき、また島影や屈曲等によってレーダで確認できない他船の動静を把握することもできるのである。さらに、AIS 情報に含まれる動的情報と静的情報によって船舶を特定することができるので、AIS は船同士の衝突回避にとっても有益となり、その上、船と陸上の航行支援施設との双方向通信により船舶の交通管理が改善されることが考えられる。AIS 搭載義務船舶が 2008 年 7 月までに搭載することになったことから、日本国内の主な海上交通センターでは既に AIS を活用した様々な業務を開始し、船舶のための安全航行の支援を行っている。

第3章では、本研究で開発した ATMS システムの構成について述べた。AIS を活用した研究には様々なものがあるが、AIS 情報を利用して安全で効率的な船舶の最適航路を計算する研究については殆ど行われていない。また、沿岸海域や東京湾・大阪湾のような比較的広い海域では、この AIS は衝突回避や海上交通センターによる交通管理のための強力なサポートシステムとなると考えられる。そこで、AIS による予定情報と航海情報に基づく自律的交通管理システムを開発した。

まず、ATMS の性能や有効性を確認するためには海上実験および操船シミュレータ実験を行

った。海上実験では、詳細な予定航路情報を AIS の Binary Message として、送受信・表示して危険判定モードを行うことに成功した。操船シミュレータ実験では、練習船および大型コンテナ船と多くの他船が予定航路を送受信し、ATMS を用いる操船は戦略的な衝突回避に極めて有用であることが操船者によって確認された。また、この実船実験および操船シミュレータ実験により、ATMS が設計通りに作動したことが確認できた。

従来の ATMS では手動によって作成する予定航路を送受信したが、開発中の ATMS に最適航路を自動的に計算できたことにより、今後の ATMS では更なる機能として最適な予定航路情報を送受信することとなる。このシステムに参加する船舶が自律的に最適航路を決定し航行するので、このシステムを「自律的交通管理システム」と呼ぶことにした。

第 4 章では、まず、一般的な DP について述べ、DP を用いる最適航路計算法について説明した。また、最適航路の安全条件として使用したバンパーモデル、SJ 値、および DCPA・TCPA についても述べた。

開発した最適航路の有効性を検証するために、仮想的な遭遇状態また AIS データおよびレーダ観測データによって得られた実際の遭遇状態についてシミュレーションを行った。シミュレーション結果より次のことが分かった。

- ① 横切りの見合い関係が多い海域では、自船が大幅に変針しなければ航行できないとき、減速する方が航海時間も短縮でき、安全な航路となる。特に 4.3 節に示した遭遇状況のような場合は減速の有効性が顕著に現れた。
- ② 浦賀水道航路の南端から釧路の沖にかけての東京湾出入り口付近の海域において、浦賀水道航路に入ろうとする船舶は、航路を出航する他船が東へ向かうか西へ向かうかを知っておけば、避航のため多くの変針を必要としなくなり、より安全に、かつ最短時間で航路に入航することができる。また、浦賀水道航路を出航する船舶は、他船がどのようなルートで入航するかを知っておけば、安全に出航することができる。
- ③ 中ノ瀬航路出口から横浜沖・扇島沖へ向かう船舶は、東京湾を南航する船舶の予定航路・速力情報が分かれば、南航船の流れをどこで安全に横切るべきか判断でき、自動的に決定された最適航路が有用であることを確認できた。

ここでは、様々な遭遇状況におけるシミュレーションを行ったことにより、最適航路の有効性を確認できた。さらに、任意の海域に ATMS を導入して交通管理を行う場合、すべての船舶について最適航路の計算方法を説明した。このシステムを導入する場合、後でシステムに参入する船舶がすでにシステムに入っている船舶の予定航路を考慮し、DP により自船の最適航路を計算するという「先船優先条件」を設定した。設定した条件に基づいて仮想的な遭遇状態において全船の最適航路を求め、ATMS 導入により海域における交通の安全性が改善される可能性を示した。

第 5 章では、ATMS の有効性を検証するための第一段階として、ATMS を導入する前に海域の交通がどのような状態にあるかについて交通評価を行った。本研究に使用したデータは AIS およびレーダ観測によるものである。AIS データは東京湾の出入り口付近の海域で取得し

たものであり、レーダ観測データは東京海洋大学の東京湾リモートレーダネットワークシステムにより得られたものである。第6章ではこれらの海域を ATMS を導入するエリアとするが、ここでは船舶の実航跡データに基づいて SJ 値、バンパーモデル、および DCPA・TCPA を用い、危険船舶の密度を計算し、また本研究で提案した海域の危険率についても求めた。その結果を以下に述べる。

- ① 東京湾の出入り口付近の海域では、朝方に多くの船舶が浦賀水道航路に入航するため危険船舶の密度が一番高くなった。特に日本船長協会の自主設定の分離通航帯の入り口付近では三つの交通評価指標によって危険な船舶が存在したと判定された。この海域において、SJ 値、バンパーモデル、および DCPA・TCPA による危険船舶の最高の密度はそれぞれ 0.051 ship/km^2 、 0.024 ship/km^2 および 0.012 ship/km^2 であった。海域全体において、SJ 値によって判定された危険率は 18.20%にも上がった。また、バンパーモデルで危険な遭遇と判定した場合の危険率は 4.11%となった。なお、DCPA・TCPA による危険率は一番小さく 0.67%であり、これはこの時間帯に横切りの見合い関係が少なかったためであると考えられる。
- ② 東京東水路・西水路から浦賀水道航路北端の出入り口の間の海域について、横浜沖では東京・千葉方面から南航する船舶と横浜沖へ向かう船舶との出会いが多いので、いつも危険船舶の密度が高かった。全日において、SJ 値、バンパーモデル、および DCPA・TCPA による危険船舶の最高の密度はそれぞれ 0.11 ship/km^2 、 0.1 ship/km^2 および 0.06 ship/km^2 であった。特に午後の時間帯には、横浜沖の他に浦賀水道航路南航レーン入り口付近で根岸からの南航船が合流して入航するため危険船舶の密度が高かった。バンパーモデルによる危険船舶の密度が最高となったのは浦賀水道航路南航レーン入り口付近である。その他、午前中には中ノ瀬航路出口から東水路北航レーンの南端までの海域ではバンパーが多く重なったことがわかった。また、DCPA・TCPA による危険船舶の分布はバンパーモデルによるのと同じ傾向にあった。さらに、全日において SJ 値、バンパーモデル、および DCPA・TCPA で計算した海域の危険率はそれぞれ 17.01%、7.73%、5.76%であった。何れの危険率も午前中と比較すれば、午後の方が高かった。即ち、午後には数多くの船舶が危険と感じたと言える。

第6章では、ATMS のシミュレーションによる安全性・効率性の評価について行った。第5章に述べた海域を ATMS 導入エリアとし、「先船優先条件」で全船の最適航路を計算した。そして、各船が最適航路を航行する場合において ATMS システムを導入する前と比較しながら海域全体の安全性および効率性の評価を行った。その結果を以下に述べる。

- ① ATMS に参加して「先船優先条件」を遵守することにより、各船舶が自律的に最適航路を計算し、様々な遭遇状態において戦略的に避航が行えることが明らかとなった。
- ② ATMS を導入することにより東京湾入り口付近の海域では、システムを導入する前と比べて SJ 値による危険船舶密度は下がり、最高の密度が 0.013 ship/km^2 のみとなった。また、SJ 値による海域の危険率は 14.97%のみとなった。バンパーモデル、また DCPA・

TCPA によって危険と判定された遭遇状態がなかったのでこの二つの評価指標による海域の危険率が 0%となった。即ち、各船が最適航路を航行することによって、SJ 値による危険率を 3.23%、バンパーモデルによる危険率を 4.11%、そして DCPA・TCPA による危険率を 0.67%改善できた。また、効率性については、海域の総航海時間を 3.88%短縮することができたと、同時に多くの船舶が最適航路の上を直線で目的地まで航行できたことによって総航海距離を 12.74 miles 減少できた。

- ③ 浦賀水道航路北端とアクアラインの間の東京湾内では、全船が最適航路を航行することにより SJ 値、バンパーモデル、および DCPA・TCPA による危険船舶の密度が低下した。全日において、SJ 値、バンパーモデル、および DCPA・TCPA による危険船舶の最高の密度がそれぞれ 0.07 ship/km^2 、 0.04 ship/km^2 および 0.04 ship/km^2 であった。また、海域の危険率に関しては、0%にすることが非常に難しいのであるが、最適航路を航行することにより全日では SJ 値、バンパーモデル、および DCPA・TCPA による危険率をそれぞれ 11.50%、6.08%、3.90%減らすことができた。さらに、効率性については、総航海時間が僅かに 0.028%上がった。これは狭い東京湾内において最適航路を航行する船舶が安全面を優先して減速で避航を行ったためである。総航海距離を計算した結果、最適航路と実航路との距離差は 27.48 miles となった。これは、最適航路において船が多くの変針を必要としないからであると考えられる。

- ④ AIS を搭載しているすべての船舶が ATMS に参加すれば、それぞれの船舶が自分の最適航路を航行することにより、海域全体の交通においてまず安全性が向上でき、その上、海域によって航海時間および航海距離も短縮することができると考えられる。

第 7 章では、自船が最適航路を航行している間に何らかの原因で航路から大きく偏れた場合に対する最適航路の再計算の結果を述べた。やむを得ず予定航路から偏れた場合は、自船がそこから一旦元の最適航路を放棄し、その位置から再びシステムに参入して、既にシステムに参加している他船の予定航路を考慮して新たな最適航路を計算するものとした。この条件に基づき、いくつかのシミュレーションを行った。その結果、再度システムに参加するときの遭遇状況によって再計算される航路は元のものとかかなり違う場合もあれば、元のものと同様航路となる場合もあることが分かった。

以上を総括すると、本研究では AIS を活用した ATMS システムを開発し、AIS による予定航路情報と航海情報に基づく最適航路の有効性と最適航路を決定できる機能を装備する ATMS の有効性を実際の船舶交通データを用いたシミュレーションにより検証できた。

ATMS の実用化に当たって、AIS を搭載していない船との遭遇が大きな問題となるだろうが、そのような遭遇によって最適航路から偏れた場合には、最適航路の再計算により対処することになる。ATMS の大きな利点は、各船が最適な予定航路情報を AIS を用いて送受信することにより、戦略的に危険な遭遇を避けられることである。特に多重遭遇においては、安全かつ効率的な避航が可能となる。

8.2 今後の課題・展望

まず、ATMS の有効性をさらに検証するため、様々な交通データを用いてシミュレーションを行い、ATMS 適用海域における交通の安全性や効率性を調査する予定である。

また、最適航路の有効性を検証するため、大型船に ATMS を搭載したものとして、操船シミュレータ実験を行う。シミュレータ実験を通じ操船者の意見を検討した上で、実海域で有効性を確認する。

さらに、現在陸上側では、東京湾海上交通センターをはじめ、他の海上交通センターも逐次 AIS を活用したシステムを構築して AIS 情報に基づく VTS センターとして生まれ変わる予定である。一方、海上側では 2002 年 7 月から 2008 年 7 月にかけて AIS が順次船舶に搭載されている。そこで、ATMS を大型船の衝突回避や VTS センターの交通管理に導入することも考えられる。最適航路決定機能を備えた ATMS システムを導入することにより、各船舶は自分で最適航路を決定し、予定航路として航行することになり、VTS センターにとっての交通管理も容易となる。

船が大型になると発生する事故の規模も大きくなり、一度海上交通事故が起きるとその周辺の自然環境を著しく汚染し一般住民も被害を受けるようになる。この ATMS を AIS 搭載船に導入することにより、船舶交通が輻輳する海域における戦略的な避航と海上交通管理のレベルアップに大きく寄与すると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々から御指導と御助言を賜りましたことに心から感謝の意を表します。

まず、東京商船大学学部4年生から東京海洋大学大学院博士後期課程在学中の6年間にわたり適切なご指導を戴き、また研究以外の面においてもお世話になりました元東京海洋大学教授の萩原秀樹先生に心より感謝の意を表します。

また、本論文を取り纏めるにあたり東京海洋大学特任教授の天津皓平先生、同大学教授の今津隼馬先生、同大学教授の庄司邦昭先生、および同大学教授の稲石正明先生から多大な助言を賜りましたことに深く感謝の意を表します。

本研究で開発したプログラム・コンピュータ技術・各種データの処理法等を教えて戴いた東京海洋大学准教授の田丸人意先生に心から感謝の気持ちを申し上げます。

本研究で行った検証シミュレーションや交通評価に用いた船舶交通データは同研究室OBの岡野匡さんから戴きました。ここに感謝の意を表します。

日本航海学会自動航法研究会（AUNAR）のメンバーの方々には様々なご意見を提供して戴きました。ここに謝意を表します。

日本政府・サトー国際奨学財団・平和中島財団から在学中の奨学金を戴きましたことに厚く御礼申し上げます。また、勉強の場を与えて下さった大島商船高等専門学校・東京商船大学・東京海洋大学と、いつも明るく親切にして下さった航路論研究室の皆さんに謝意を表します。

最後に、母国からいつも励ましの言葉を戴いた両親に、日本での留学の生活において精神面・健康面を支え、いつも側にいて励ましてくれた妻に心より感謝します。

参考文献

本研究に関連した発表論文等の参考文献の一覧を下記に記す。

- (1) 東京湾における船舶の航行安全：日本海難防止協会情報誌、第 524 号、2005 年
- (2) 藤井弥平・巻島勉・原潔：海上交通工学、海文堂、1981 年
- (3) 長谷川和彦、横山伸介、塩地誠、丹羽量久、谷口悟、森茂、中島敏和、矢内崇雅：輻輳海域船舶航行シミュレータの開発とその応用例、「AIS の現状と展望」2004 年
- (4) Hideki Hagiwara, Kohei Ohtsu, Ruri Shoji, Hitoi Tamaru, Hironao Takahashi and Akira Nakaba: New Traffic Management System Based on AIS and Planned Route Information, Proceedings of 11th IAIN World Congress, Berlin Germany, 2003.10
- (5) 小林英一：AIS の通信技術開発と基本的な運用について、「AIS の現状と展望」2004 年
- (6) 福戸淳司：他船情報の自動収集の試みと展望、「AIS の現状と展望」2004 年
- (7) 藤坂貴彦：AIS とレーダとの目標統合簡略化のための船用レーダのコヒーレント化について、「AIS の現状と展望」2004 年
- (8) AIS を活用した港内船舶交通管理（東京湾）に関する調査
- (9) http://www.kaiho.mlit.go.jp/03kanku/14todaibu/01tokusyoku/02_ais/coverage_j.htm
- (10) 萩原秀樹、大津皓平、庄司るり、田丸人意、高橋宏直、中場晃：AIS と予定航路情報に基づく新交通管理システム、日本航海学会誌、第 160 号、2004 年
- (11) 田丸人意、萩原秀樹、庄司るり、大津皓平：AIS と予定航路情報に基づく最適航路決定に関する研究、日本航海学会論文集、第 111 号、2004 年
- (12) トラン ヴィエト フォン、萩原秀樹、田丸人意、庄司るり：AIS による予定航路情報と航海情報に基づく戦略的に関する研究、日本航海学会論文集、第 113 号、2005 年
- (13) 尾形克彦：ダイナミック・プログラミング、培風館、1973 年
- (14) Arnfinn Hammer, Kiyoshi Hara : Knowledge Acquisition for Collision Avoidance Maneuver by Ship Handling Simulator, MARSIM & ICSM 90 Tokyo, Japan, 1990
- (15) 劉順、岡野匡、萩原秀樹、庄司るり、田丸人意、大津皓平：東京湾における船舶交通観測レーダネットワークシステムの研究、日本航海学会論文集、第 111 号、2004 年
- (16) Tran Viet HUNG, Hideki HAGIWARA, Hitoi TAMARU, Kohei OHTSU and Ruri SHOJI : Strategic Collision Avoidance Based on Planned Route and Navigational Information Transmitted by AIS, Proceedings of Asia Navigation Conference 2005
- (17) トラン ヴィエト フォン、萩原秀樹、田丸人意：AIS による予定航路情報と航海情報に基づく戦略的に関する研究－Ⅱ（一交通管理海域における安全性・効率性評価－）、日本航海学会論文集、第 117 号、2007 年
- (18) 東京国際空港再拡張に係る船舶航行安全対策検討調査報告書（案）、2006 年